

*Водные биоресурсы и среда обитания*  
2025, том 8, номер 3, с. 18–28  
<http://journal.azniirkh.ru>, [www.azniirkh.ru](http://www.azniirkh.ru)  
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



*Aquatic Bioresources & Environment*  
2025, vol. 8, no. 3, pp. 18–28  
<http://journal.azniirkh.ru>, [www.azniirkh.ru](http://www.azniirkh.ru)  
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

## Биология и экология гидробионтов

УДК 574.589

[https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2025\\_8\\_3\\_18](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2025_8_3_18)

EDN: JOJAUT



**Для цитирования:** Дорошенко Ю.В., Бурдиян Н.В. Динамика формирования аэробно-анаэробного микроперифитона пилотной установки системы гидробиологической очистки. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2025. Т. 8, № 3: 18–28. [https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2025\\_8\\_3\\_18](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2025_8_3_18).

**For citation:** Doroshenko Yu.V., Burdiyan N.V. Dynamics of aerobic and anaerobic microperiphyton formation in a pilot installation of a hydrobiological purification system. *Aquatic Bioresources & Environment*. 2025. Vol. 8, no. 3: 18–28. [https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2025\\_8\\_3\\_18](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2025_8_3_18). (In Russian).

# ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ АЭРОБНО-АНАЭРОБНОГО МИКРОПЕРИФИТОНА ПИЛОТНОЙ УСТАНОВКИ СИСТЕМЫ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

Ю. В. Дорошенко\*, Н. В. Бурдиян

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ), Севастополь 299041, Россия

\*E-mail: [doroshenko\\_yuv@ibss-ras.ru](mailto:doroshenko_yuv@ibss-ras.ru)

### Аннотация

**Введение.** Разлив мазута, произошедший вследствие аварии танкеров в Керченском проливе в декабре 2024 г., нанес значительный вред экосистеме Черного моря. **Актуальность.** В свете данных событий стал актуальным вопрос установки в прибрежной акватории Черного моря систем гидробиологической очистки (искусственных рифов), в основе действия которых лежат естественные процессы самоочищения морской среды, в т. ч. и от углеводородов нефти. **Целью** работы было изучение особенностей формирования некоторых физиологических групп аэробно-анаэробного бактериального сообщества макроперифитона системы гидробиологической очистки (СГО). **Методы.** Отбор проб и последующая обработка материала осуществлялись на основе стандартных методов гидробиологии и общей микробиологии. **Результаты.** Установлено, что в годовом цикле наблюдений численность гетеротрофных и углеводородокисляющих бактерий в макроперифитоне, сформировавшемся на установленных сетевых элементах СГО, в несколько раз превышает таковую в морской воде, как вблизи СГО, так и на удалении от нее. Деструкция органического вещества в СГО с участием кислорода повсеместно сочеталась с его анаэробной трансформацией. Сезонные различия количественного содержания анаэробных групп бактерий не отмечены. **Выводы.** Бактериальная активность (способность утилизировать органические соединения) несколько выше в районе установки экспериментальной системы, чем на удалении от нее, и существенно возрастает непосредственно в перифитоне сетевых элементов системы, что

подтверждает высокую сорбционную емкость перифитона системы гидробиологической очистки и ее активную роль в процессах самоочищения акватории.

**Ключевые слова:** бактерии, системы гидробиологической очистки (искусственные рифы), Черное море

## DYNAMICS OF AEROBIC AND ANAEROBIC MICROPERTIPHYTON FORMATION IN A PILOT INSTALLATION OF A HYDROBIOLOGICAL PURIFICATION SYSTEM

Yu. V. Doroshenko\*, N. V. Burdiyan

*Federal Research Center "A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS" (FRC IBSS), Sevastopol 299011, Russia*

*\*E-mail: doroshenko\_yuv@ibss-ras.ru*

### Abstract

**Background.** The fuel oil spill, which occurred after a tanker accident in the Kerch Strait in December 2024, caused considerable damage to the Black Sea ecosystem. **Relevance.** Due to the recent events, the installation of hydrobiological purification systems (artificial reefs) in the coastal waters of the Black Sea has become an urgent issue. These systems are based on the natural processes of self-purification of the marine environment, including the removal of oil hydrocarbons. The **aim** of this work was to study the features of the formation of some physiological groups of the aerobic and anaerobic bacterial community of macropertiphyton in a hydrobiological purification system (HPS).

**Methods.** Sampling and subsequent processing of the material were carried out in accordance with standard methods used in hydrobiology and general microbiology. **Results.** It was found that, in the annual cycle of observations, the abundance of heterotrophic and hydrocarbon-oxidizing bacteria in the macropertiphyton formed on the installed netting components of the HPS is several times higher than in seawater, both near the HPS and at some distance from it. The degradation of organic matter in the HPS involving the oxygen was generally accompanied by its anaerobic transformation. No seasonal differences in the quantitative content of anaerobic bacterial groups were observed.

**Conclusion.** Bacterial activity (ability to process and remove organic compounds) is moderately higher in the vicinity of the experimental system installation than at a distance from it and significantly increases within the periphyton of the netting components of the system, which confirms the high sorption capacity of the periphyton of the hydrobiological purification system and its crucial role in the self-purification processes in this water area.

**Keywords:** bacteria, hydrobiological purification systems (artificial reefs), Black Sea

### ВВЕДЕНИЕ

Разлив мазута, произошедший вследствие аварии танкеров в Керченском проливе в декабре 2024 г., нанес значительный вред экосистеме Черного моря. В свете данных событий стал актуальным вопрос установки в прибрежной акватории Черного моря систем гидробиологической очистки, в основе действия которых лежат естественные процессы самоочищения морской среды, в т. ч. и от углеводородов нефти.

Гидробиологическая мелиорация — улучшение качества водной среды в результате жизнедеятельности сообществ водных организмов. Данное понятие в широком смысле отражает процесс

кондиционирования среды, включающий снижение концентрации взвешенных и растворенных в воде загрязняющих веществ различной природы, а также обогащение воды кислородом и органическими веществами (витамины, аминокислоты и пр.), необходимыми для нормального развития водных растений и животных, что создает благоприятные условия для использования воды человеком [1].

Возможность целенаправленного использования морских организмов для очистки морской воды и оздоровления прибрежных акваторий была сформулирована О.Г. Мироновым еще в 1969 г. [2]. Дальнейшие многолетние исследования заложены

жили теоретическую базу для разработки систем гидробиологической очистки (искусственных рифов), в основе действия которых лежат естественные процессы самоочищения морской среды [3, 4]. Подобные исследования проводились в различных районах Мирового океана [5–7]. Согласно [7], за рубежом среди стран — пионеров по внедрению искусственных рифов можно выделить Японию, США и Италию. В последние несколько лет большинство работ в области микробной экологии искусственных рифов приходится на Китай, чему способствует активное внедрение здесь данной технологии [8].

Микроорганизмы, такие как бактерии, археи, грибы, простейшие и одноклеточные водоросли, играют жизненно важную роль в экосистеме искусственных рифов, внося значительный вклад в перенос вещества, энергии и глобальный биогеохимический цикл. Именно микроперифитон играет решающую роль в формировании макрообрастаний посредством таких процессов, как трансформация питательных веществ, биodeградация и симбиотические отношения [9].

Микробное сообщество, в первую очередь, зависит от конструкции искусственных рифов, хотя конкретные эффекты различаются в зависимости от типов рифов, условий строительства, прямых или косвенных факторов окружающей среды [8]. Разработка и использование различных конструкций систем гидробиологической очистки (искусственных рифов) не теряет своей актуальности в связи с возможностью их использования для биоремедиации прибрежных акваторий [10].

При решении вопроса об использовании гидробиологических систем для улучшения экологической обстановки в прибрежной зоне г. Севастополя основное внимание уделяется трансформации нефтяных углеводородов [4].

Проведенные опыты [11] по изучению процесса биodeградации нефти и нефтепродуктов в морской воде в замкнутых объемах с применением многофакторного эксперимента показали, что между экологическими факторами создаются сложные взаимосвязи, которые изменяются во времени. Наряду с такими экофакторами, как температура, концентрация биогенных солей или содержание кислорода, возникают другие — например, изменения в структуре микробного сообщества, появление продуктов распада и жизнедеятельности бактерий и т. д., которые в

тот или иной отрезок времени могут оказывать существенное влияние на биodeградацию нефти.

Таким образом, изучение функционирования как отдельных звеньев, так и всей СГО в целом является одной из насущных задач морской санитарной гидробиологии.

Целью настоящего исследования было изучение особенностей формирования некоторых физиологических групп аэробно-анаэробного бактериального сообщества макроперифитона системы гидробиологической очистки.

В задачи исследования входило:

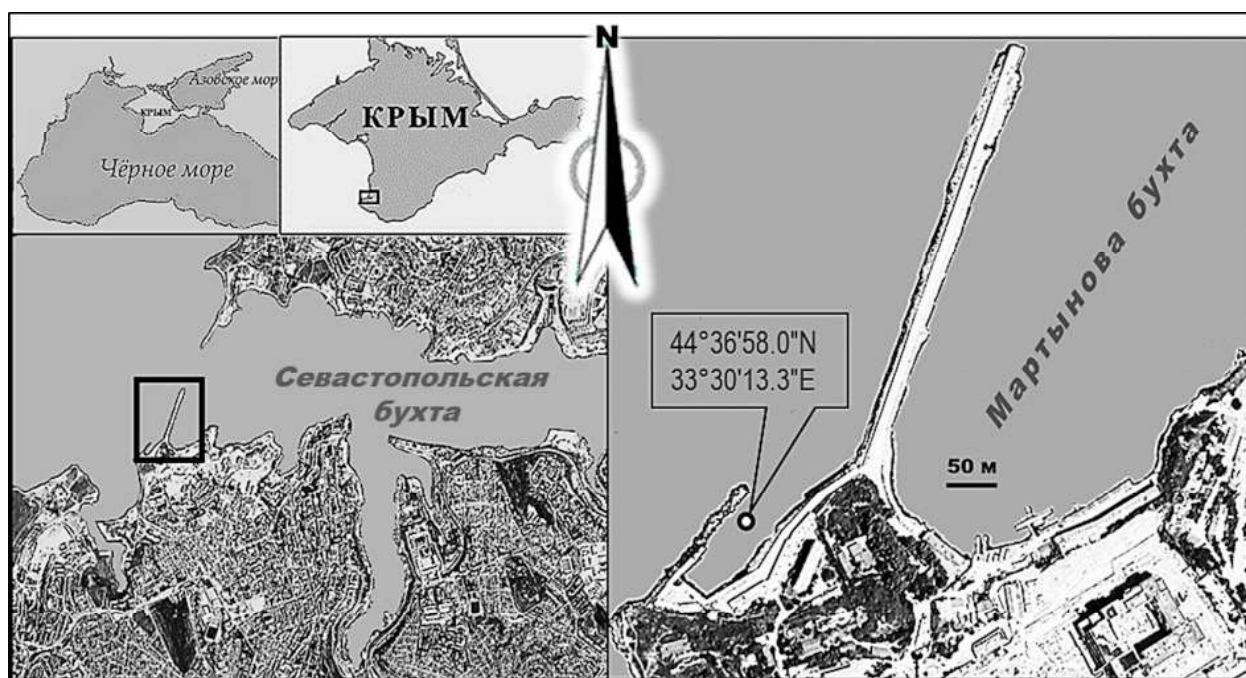
- получение количественных характеристик гетеротрофной, углеводородокисляющей, денитрифицирующей, сульфатредуцирующей и тионовой групп бактерий в микроперифитоне макрообрастаний пилотной установки системы гидробиологической очистки;
- определение численности гетеротрофной и углеводородокисляющей групп бактерий, общего микробного числа в воде (с глубины 3 м) непосредственно вблизи СГО и на удалении 20 м от места ее установки для общей характеристики акватории.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальный образец системы гидробиологической очистки (СГО) морских вод был установлен в апреле в прибрежной зоне г. Севастополя (акватория Радиобиологического корпуса ФИЦ ИнБЮМ) для проведения натурного эксперимента на глубине 5 м (рис. 1).

Одновременно с установкой СГО на этом участке акватории в непосредственной близости были выставлены рамки, обтянутые сетевым материалом, аналогичным материалу экспериментального образца (рис. 2). Количество установленных рамок (12) обеспечивало круглогодичный контроль состава обрастаний с периодичностью 1 раз в месяц. Впоследствии, ближе к концу исследования, во время шторма оторвало одну рамку. Первое изъятие рамки для изучения микроперифитона было выполнено через 1 месяц после установки. Транспортировку и обработку проб обрастаний с рамок осуществляли согласно [12].

В пробах обрастаний методом предельных разведений определяли численность гетеротрофных (ГБ), углеводородокисляющих (УОБ), сульфатредуцирующих (СРБ), тионовых (ТБ) и денитрифицирующих (ДНБ) групп бактерий.



**Рис. 1.** Место установки системы гидробиологической очистки (СГО)

**Fig. 1.** Installation site of the hydrobiological purification system (HPS)



**Рис. 2.** Внешний вид съемного конструктивного элемента СГО

**Fig. 2.** General view of a removable structural component of the HPS

Одновременно отбирались пробы морской воды с глубины 3 м над экспериментальным образцом («риф») и на удалении 20 м от места его установки («контроль»). В пробах морской воды определяли численность ГБ, УОБ и проводили определение общего микробного числа как основного индикатора общей бактериальной загрязненности воды. Отбор проб воды производили и общее микробное число (ОМЧ) определяли согласно ГОСТ 31942–2012. Для определения численности ГБ использовали среду с пептоном. УОБ высевали на среде Ворошиловой–Диановой, в которую в качестве единственного источника углерода и энергии добавляли стерильную нефть (1 % от объема) [13]. Численность СРБ определяли на среде Постгейта, в качестве восстановителя в среду добавляли 3%-ный раствор сернистого натрия. Численность тионовых бактерий определялась на среде Сорокина. Количество ДНБ определяли на среде Гильтая. При приготовлении сред учитывали соленость морской воды. Наиболее вероятное число микроорганизмов в единице объема рассчитывали по таблице Мак-Креди (в трех повторностях), основанной на методе вариационной статистики [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Перифитон.** Биообрастание — это динамический процесс, который включает временные количественные и качественные сдвиги в микро- и макрообрастаниях [15].

В перифитоне, развивающемся на конструктивных элементах СГО, численность гетеротрофных бактерий изменялась от  $2,5 \times 10^5$  до  $9,5 \times 10^6$  кл./г, причем в 64 % проб количество бактерий исчислялось миллионами клеток (рис. 3а). Минимальные значения гетеротрофов отмечались в весенние месяцы (май, март) и не превышали 250 тыс. кл./г, а максимальное — в августе, соотносясь с повышением температуры морской воды.

УОБ выделены в 100 % проб. Их численность широко варьировала от минимальных значений (95 кл./г) в мае и феврале до максимального ( $2,5 \times 10^5$  кл./г) в августе (рис. 3б). В 73 % проб количество бактерий превышало 1 тыс. клеток в 1 г обрастаний.

Согласно [16], существует тесная взаимосвязь между материалом искусственных рифов и развитием микробных сообществ. Однако в исследовании [17] показано, что существует мало различий между микробиомами перифитона, развивающегося на металлических и цементных носителях, но загрязнение нефтью увеличивает численность микроорганизмов искусственных рифов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что существенных различий по численности ГБ в перифитоне исследуемых элементов СГО (капроновая сеть) и причальных стенок (бетон) [18] не обнаружено. В то же время, в многолетних макрообрастаниях различных вариантов СГО (металлический и капроновый носители), установ-

ленных ранее в акватории Севастопольской бухты, данный показатель был выше на 1-2 порядка [4].

Численность УОБ была на 1-2 порядка выше в экспериментальных образцах, чем в сформировавшемся ранее сообществе причальных стенок, но сопоставима с многолетними обрастаниями СГО [4, 18]. Вероятно, на структуру микроперифитонного сообщества в большей степени влияют изменяющиеся факторы окружающей среды (содержание питательных веществ, температура, концентрация растворенного кислорода, состав макрообрастаний), чем материал конструктивных элементов [19].

Одним из критериев оценки экологического состояния морской береговой зоны Черного моря служат результаты исследования анаэробных бактерий перифитона как показателей преобразования антропогенного загрязнения в условиях дефицита кислорода. Следует отметить, что анаэробная биотрансформация нефтяных углеводов происходит при участии сульфатредуцирующих [20, 21], денитрифицирующих [22] и тионовых групп бактерий [23].

СРБ были выделены в 100 % проб обрастаний СГО. Численность СРБ в течение цикла наблюдений варьировала в широком диапазоне: от 1 до  $4,5 \times 10^2$  кл./г (рис. 4а). Через месяц после установки СГО в мае и далее в июне численность СРБ составляла 25 клеток в грамме обрастаний. Максимальный показатель ( $4,5 \times 10^2$  кл./г) получен в августе, однако уже в сентябре показатели численности СРБ упали до минимума. Относительно высокая численность (150 кл./г) отмечена в июльской и октябрьской пробах. Численность СРБ в ноябре и марте — 95 кл./г. Равная численность

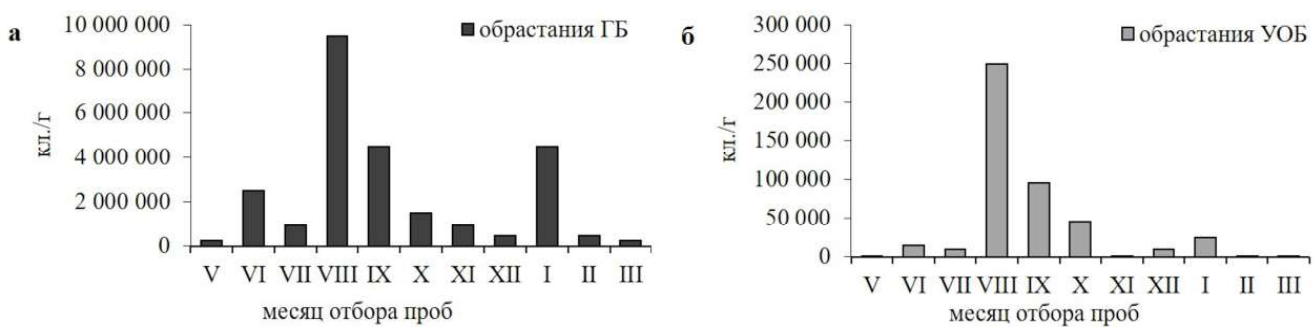
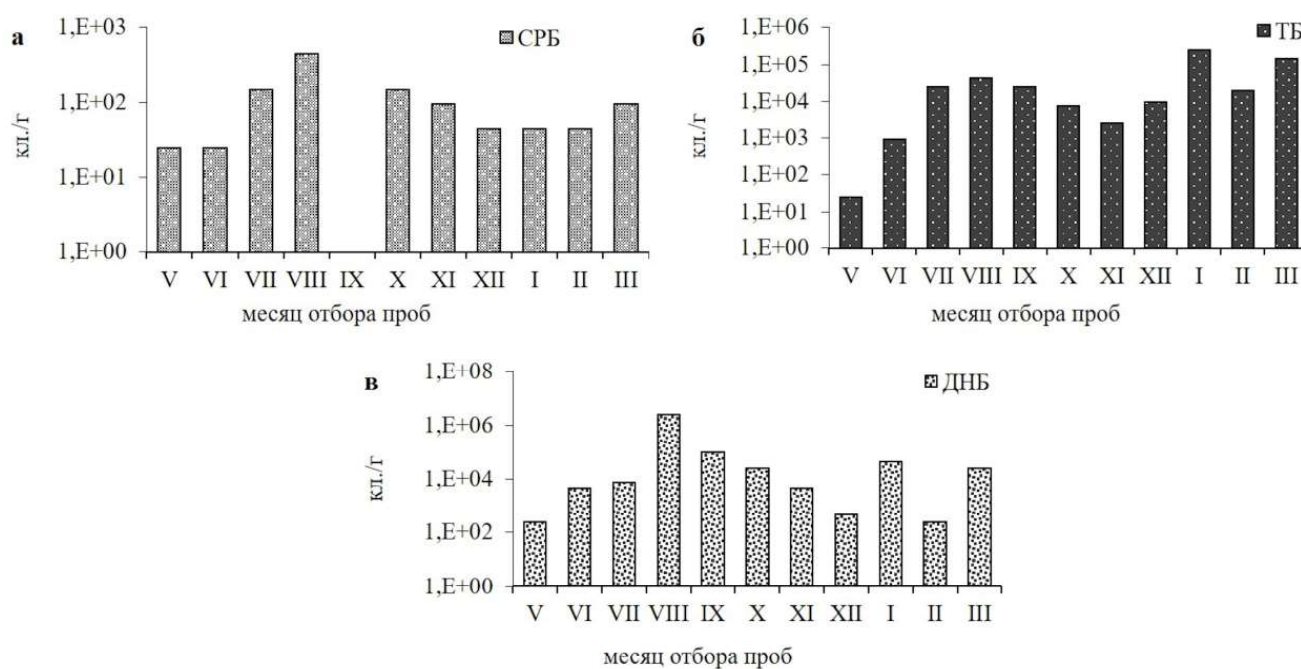


Рис. 3. Численность (кл./г) бактерий в перифитоне конструктивных элементов СГО: а — гетеротрофных (ГБ), б — углеводородокисляющих (УОБ)

Fig. 3. Abundance (cells/g) of bacteria in the periphyton of the HPS structural components: а — heterotrophic (HB), б — hydrocarbon-oxidizing (HOB)



**Рис. 4.** Численность (кл./г) бактерий в перифитоне конструктивных элементов СГО: а — сульфатредуцирующих (СРБ), б — тионовых (ТБ), в — денитрифицирующих (ДНБ)

**Fig. 4.** Abundance (cells/g) of bacteria in the periphyton of HPS structural components: а — sulfate-reducing (SRB), б — thionic (TB), в — denitrifying (DNB)

(45 кл./г) наблюдалась в перифитоне СГО с декабря по февраль. Следует отметить, что численность СРБ в перифитоне СГО ниже, чем в перифитоне причальных стенок [24], что, по всей видимости, связано с большим содержанием кислорода в силу особенностей конструкции СГО.

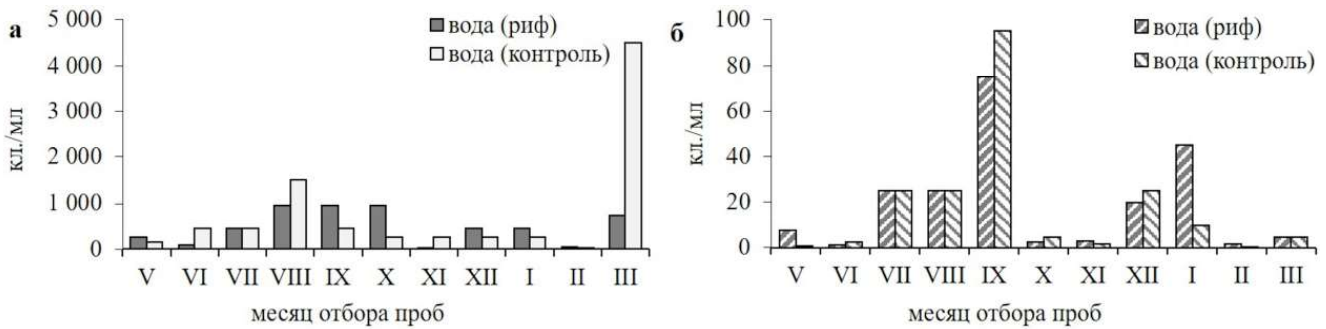
Тионовые бактерии выделены из всех проб макрообрастаний СГО; их численность колебалась в диапазоне от 25 до  $2,5 \times 10^5$  кл./г (рис. 4б). Минимум ТБ за весь период наблюдений был отмечен через месяц после установления СГО, в майской пробе, что схоже с результатами [18]. В июне численность ТБ увеличилась до 950 кл./г, а в период с июля по декабрь, а также в феврале и марте в образцах перифитона СГО она варьировала в диапазоне от  $2,5 \times 10^3$  до  $4,5 \times 10^4$  кл./г. В 82 % проб численность ТБ оставалась в пределах третьего порядка, что схоже с данными годовых наблюдений, проведенных в акватории бух. Севастопольской на участках с выраженной антропогенной нагрузкой [18, 24].

ДНБ выявлены в 100 % проб. Численность денитрификаторов колебалась от  $2,5 \times 10^2$  до  $2,5 \times 10^6$  кл./г (рис. 4в). Максимум ДНБ был отмечен в августе, на порядок ниже — в следующие два месяца. Минимальные показатели численности ДНБ ( $2,5 \times 10^2$  кл./г) выявлены в майской и

февральской пробах. В 64 % проб численность ДНБ колебалась от  $4,5 \times 10^3$  до  $9,5 \times 10^4$  кл./г, что схоже с показателями, полученными в перифитоне причальных стенок [18, 24]. Как известно [25], помимо пониженного содержания кислорода, необходимым условием для осуществления процесса денитрификации является наличие легкодоступного органического вещества, что объясняет высокий (0,85) коэффициент корреляции между численностью ДНБ и ГБ.

*Морская вода.* Общая численность гетеротрофов в морской воде, отобранной над элементами СГО (вода «риф»), в течение года варьировала в пределах 20–950 кл./мл (рис. 5а). В пробах, отобранных на удалении от СГО (вода «контроль»), численность ГБ за весь период наблюдений колебалась от 20 до 1500 кл./мл. Незначительное, в пределах одного порядка, увеличение численности на обеих станциях было сопряжено с повышением температуры морской воды. Исключение составляет максимальное значение (4500 кл./мл), зафиксированное единожды в марте на удалении от СГО, что может свидетельствовать о попадании в воду легкодоступной органики [26].

УОБ в морской воде на обеих станциях («риф» и «контроль») выселяны в 100 % проб. Численность в течение года не превышала 95 клеток в мл

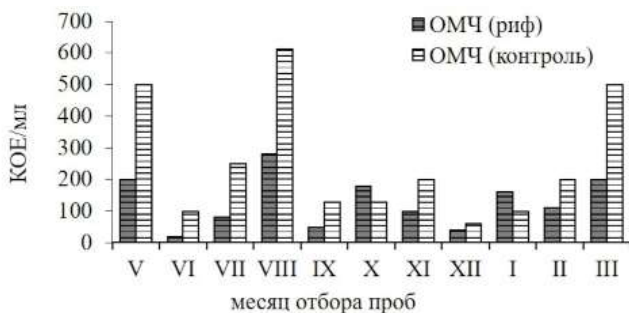


**Рис. 5.** Численность (кл./мл) бактерий в морской воде над элементами СГО (вода «риф») и на удалении от них (вода «контроль»): а — гетеротрофных (ГБ), б — углеводородокисляющих (УОБ)

**Fig. 5.** Abundance (cells/mL) of bacteria in seawater above the HPS components (water “reef”, the left bar) and at a distance (water “control”, the right bar): а — heterotrophic (HB), б — hydrocarbon-oxidizing (HOB)

морской воды (рис. 5б), что свидетельствует об отсутствии нефтяного загрязнения в исследуемой акватории. В целом, количественные показатели ГБ и УОБ характерны для акватории Севастопольского региона [12].

Исторически вопросы загрязнения морской среды рассматривались с точки зрения влияния этого фактора на здоровье населения. Поэтому основной упор делался на изучение микроорганизмов, свидетельствующих о загрязнении морской воды хозяйственно-фекальными стоками [26], в частности на выявление общего микробного числа санитарно-показательной группы бактерий, отражающей гигиеническую ситуацию в водном объекте и служащей основным индикатором общей бактериальной загрязненности воды. Результаты определения ОМЧ показали (рис. 6),



**Рис. 6.** Общее микробное число (ОМЧ) (КОЕ/мл) в морской воде над элементами СГО (вода «риф») и на удалении от них (вода «контроль»)

**Fig. 6.** Total bacterial count (TBC) (CFU/mL) in seawater above the HPS components (water “reef”, the left bar) and at a distance (water “control”, the right bar)

что только в двух пробах морской воды, отобранных во время волнового перемешивания, ОМЧ на станции «риф» (район установки СГО) было несколько выше показателей станции «контроль» (в 20 м от СГО); остальные значения ОМЧ в районе контроля превышают значения ОМЧ в районе СГО, что может свидетельствовать об улучшении качества водной среды вблизи установки СГО, несмотря на явную дискуссионность вопроса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных микробиологических работ показали, что в перифитоне, развивающемся на конструктивных элементах пилотной установки системы гидробиологической очистки, численность гетеротрофных бактерий изменялась от  $2,5 \times 10^5$  до  $9,5 \times 10^6$  кл./г, углеводородокисляющих бактерий — от 95 до  $2,5 \times 10^5$  кл./г. Численность данных групп бактерий в перифитоне в несколько раз превышает таковую в морской воде.

Деструкция органического вещества на конструктивных элементах СГО с участием кислорода повсеместно сочеталась с его анаэробной трансформацией. Анаэробные бактерии выделены в широком диапазоне: численность сульфатредуцирующих бактерий варьировала от 1 до 450 кл./г, тионовых бактерий — от 25 до  $2,5 \times 10^5$  кл./г, денитрифицирующих бактерий — от  $2,5 \times 10^2$  до  $2,5 \times 10^6$  кл./г. Сезонные различия количественного содержания исследуемых анаэробных групп бактерий не отмечены.

Бактериальная активность (способность утилизировать органические соединения) несколько выше в районе установки экспериментальной

системы, чем на удалении от нее, и существенно возрастает непосредственно в перифитоне сетевых элементов системы, что подтверждает высокую сорбционную емкость перифитона системы гидробиологической очистки и ее активную роль в процессах самоочищения акватории.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме № 125050605819-8 «Оценка нефтяного загрязнения морских прибрежных акваторий Крымского полуострова в результате катастрофы в Керченском проливе в декабре 2024 г. и разработка рекомендаций по оздоровлению прибрежных акваторий через стимулирование процессов естественного самоочищения».

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории хемозологии отдела радиационной и химической биологии ФИЦ ИнБЮМ за помощь в отборе проб.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out within the framework of IBSS state research assignment “Assessment of oil pollution of coastal marine waters of the Crimean Peninsula resulting from the Kerch Strait disaster in December 2024 and development of recommendations for improving coastal waters by stimulating natural self-purification processes” (No. 125050605819-8).

The authors are grateful to the staff of the Chemoecology Laboratory of the Radiation and Chemical Biology Department of the SRC IBSS RAS for their assistance with sample collection.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курапов А.А., Колмыков Е.В., Умербаева Р.И., Попова Н.В., Зубанов С.А. Научные основы оздоровления экологической обстановки в районах добычи углеводородов на Северном Каспии. Астрахань: Издательский дом Сорокина Романа Васильевича, 2022. 106 с.
2. Миронов О.Г. К вопросу о самоочищении морской воды от нефтепродуктов. *Гидробиологический журнал*. 1969. Т. 5, № 4: 89–93.
3. Mironov O.G., Schekaturina T.L., Alyomov S.V. Perspectives of using of marine polluted water cleaning hydrobiological method for sanitation and improvement of the coastal aquatoria state. *Oil spills in the Mediterranean and Black Sea regions. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference (Istanbul, 31 October – 3 November, 2000)*. Istanbul, 2000: 187–195.
4. Миронов О.Г., Алемов С.В., Щекатурина Т.Л., Осадчая Т.С., Соловьева О.В., Бурдяян Н.В., Тихонова Е.А., Миронов О.А., Дорошенко Ю.В., Гусева Е.В., Муравьева И.П., Витер Т.В., Волков Н.Г. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века. Симферополь: Ариал, 2018. 276 с. <https://doi.org/10.21072/978-5-907118-89-8>.
5. Афанасьев Д.Ф., Корпакова И.Г., Барабашин Т.О., Грицыхин В.А., Елецкий Б.Д., Чередников С.Ю. Экосистема Азовского моря: перифитон искусственных субстратов. Ростов-н/Д.: Изд-во АЗНИИРХ, 2009. 80 с.
6. Суздалева А.Л., Безносков В.Н. Искусственный риф: статус, жизненный цикл и оценка воздействия на окружающую среду. *Гидротехническое строительство*. 2021. № 6: 45–49.
7. Bracho-Villavicencio C., Matthews-Cascon H., Rossi S. Artificial reefs around the world: A review of the state of the art and a meta-analysis of its effectiveness for the restoration of marine ecosystems. *Environments*. 2023. Vol. 10, no. 7: e121. <https://doi.org/10.3390/environments10070121>.
8. Wang L., Liang Zh., Chai Z., Cong W., Zhu L., Guo Zh., Song M., Ma J., Guo T., Zhang W., Zheng W., Jiang Zh. Construction and evolution of artificial reef ecosystems: Response and regulation of marine microorganisms. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 367: e125610. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125610>.
9. Yan J., Wei X., Si L., Zhang Z., Zhao J., Deng L., Tian T., Li Q., Yin Z., Wu Zh. Bacterial community composition and its relationship with environmental factors in the artificial reef area for marine ranching in Changhai County. *Animals*. 2025. Vol. 15, no. 5: e639. <https://doi.org/10.3390/ani15050639>.
10. Воскобойников Г.М., Ильинский В.В., Лопушанская Е.М., Макаров М.В., Пуговкин Д.В., Рыжик И.В., Ляймер А.В., Йенсен Дж.Б. Санитарная водорослевая плантация для очистки прибрежных акваторий от нефтепродуктов: от теории к практике. *Вопросы современной альгологии*. 2017. № 3 (15): 1–25.
11. Кузнецов А.Н. Закономерности трансформации нефтяного загрязнения в водных экосистемах : автореф. дис. канд. геогр. наук. Ростов-н/Д.: Изд-во Ростовского государственного университета, 2005. 27 с.
12. Дорошенко Ю.В. Микрофлора акватории в районе размещения систем гидробиологической очистки морских вод. *Экология моря*. 2007. Вып. 73: 36–43.
13. Биологические аспекты нефтяного загрязнения морской среды / под ред. О.Г. Миронова. К.: Наукова думка, 1988. 247 с.

14. Практикум по микробиологии : учеб. пособие / под ред. А.И. Нетрусова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 608 с.
15. Abed R.M.M., Al Fahdi Dh., Muthukrishnan T. Short-term succession of marine microbial fouling communities and the identification of primary and secondary colonizers. *Biofouling*. 2019. Vol. 35, issue 5: 526–540. <https://doi.org/10.1080/08927014.2019.1622004>.
16. Kegler H.F., Lukman M., Teichberg M., Plass-Johnson J., Hassenrück Ch., Wild Ch., Gärdes A. Bacterial community composition and potential driving factors in different reef habitats of the Spermonde Archipelago, Indonesia. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8: e662. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00662>.
17. Yao J., Zhu T., Liu H., Zhang Y., Ding G., Xin M.L., Nie M. Response of artificial reef microbiome of different materials to oil pollution. *The Journal of Fudan University (Natural Science)*. 2021. Vol. 60: 73–83.
18. Бурдиян Н.В., Дорошенко Ю.В. Динамика численности микробиоты в перифитоне гидротехнического сооружения (Севастополь, Черное море). *Морские биологические исследования: достижения и перспективы : матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции (г. Севастополь, 19–24 сентября 2016 г.)*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Т. 2: 43–45.
19. Yan J., Yue Yu., Lin Sh., Gu H., Han Z., Li Q., Tian T., Wei X., Wu Zh. Preliminary study on the structure of fungal communities in artificial reef areas in the Northern Yellow Sea. *Oceans*. 2025. Vol. 6, no. 1: e11. <https://doi.org/10.3390/oceans6010011>.
20. Zhang Z., Guo H., Sun J., Gong X., Wang Ch., Wang H. Anaerobic phenanthrene biodegradation by a newly isolated sulfate-reducer, strain PheS1, and exploration of the biotransformation pathway. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 797: e149148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149148>.
21. Dell'Anno F., Rastelli E., Sansone C., Brunet Ch., Ianora A., Dell'Anno A. Bacteria, fungi and microalgae for the bioremediation of marine sediments contaminated by petroleum hydrocarbons in the Omics era. *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, no. 8: e1695. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081695>.
22. Rockne K.J., Strand S.E. Anaerobic biodegradation of naphthalene, phenanthrene, and biphenyl by a denitrifying enrichment culture. *Water Research*. 2001. Vol. 35, issue 1: 291–299. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00246-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00246-3).
23. Назина Т.Н., Павлова Н.К., Татаркин Ю.В., Шестакова Н.М., Бабич Т.Л., Соколова Д.Ш., Ивойлов В.С., Хисаметдинов М.Р., Ибатуллин Р.Р., Турова Т.П., Беляев С.С., Иванов М.В. Микроорганизмы карбонатной нефтяной залежи 302 Ромашкинского месторождения и их биотехнологический потенциал. *Микробиология*. 2013. Т. 82, № 2: 191–202. <https://doi.org/10.7868/s0026365613020122>.
24. Бурдиян Н.В. Анаэробные бактерии перифитона бухты Артиллерийская (Севастополь, Черное море). *Экосистемы, их оптимизация и охрана*. 2014. № 11 (30): 174–178.
25. Разумов В.А., Тютюнова Ф.И. Нитритное загрязнение р. Москвы: причины и следствия. *Водные ресурсы*. 2001. № 3: 356–366.
26. Sumampouw O.J., Risjani Y. Bacteria as indicators of environmental pollution: Review. *International Journal of Ecosystem*. 2014. Vol. 4, no. 6: 251–258. <https://doi.org/10.5923/j.ije.20140406.03>.

## REFERENCES

1. Kurapov A.A., Kolmykov E.V., Umerbaeva R.I., Popova N.V., Zubanov S.A. Nauchnye osnovy ozdorovleniya ekologicheskoy obstanovki v rayonakh dobychi uglevodorodov na Severnom Kaspii [Scientific basis for improving the environmental situation in hydrocarbon production areas in the Northern Caspian Sea]. Astrakhan: Izdatel'skiy dom Sorokina Romana Vasilyevicha [Publishing house of Sorokin Roman Vasilyevich], 2022. 106 p. (In Russian).
2. Mironov O.G. K voprosu o samoochishchenii morskoy vody ot nefteproduktov [On the problem of self-purification of sea water from oil products]. *Gidrobiologicheskii zhurnal [Hydrobiological Journal]*. 1969. Vol. 5, no. 4: 89–93. (In Russian).
3. Mironov O.G., Schekaturina T.L., Alyomov S.V. Perspectives of using of marine polluted water cleaning hydrobiological method for sanitation and improvement of the coastal aquatoria state. In: *Oil spills in the Mediterranean and Black Sea regions. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference (Istanbul, 31 October – 3 November, 2000)*. Istanbul, 2000: 187–195.
4. Mironov O.G., Alemov S.V., Shchekaturina T.L., Osadchaya T.S., Solovyeva O.V., Burdiyan N.V., Tikhonova E.A., Mironov O.A., Doroshenko Yu.V., Guseva E.V., Muravyeva I.P., Viter T.V., Volkov N.G. Sanitarno-biologicheskie issledovaniya pribrezhnykh akvatoriy yugo-zapadnogo Kryma v nachale XXI veka [Sanitary and biological studies of the South-Western Crimea coastal waters at the beginning of XXI century]. Simferopol: Arial, 2018. 276 p. <https://doi.org/10.21072/978-5-907118-89-8>. (In Russian).
5. Afanasyev D.F., Korpakova I.G., Barabashin T.O., Gritsykhin V.A., Eletskiy B.D., Cherednikov S.Yu. Ekosistema Azovskogo morya: perifiton iskusstvennykh substratov [Ecosystem of the Sea of Azov: Periphyton of artificial substrates]. Rostov-on-Don: AzNIIRKH Publ., 2009. 80 p. (In Russian).
6. Suzdaleva A.L., Beznosov V.N. Artificial reef: Status, life cycle, and environmental impact assessment.

- Power Technology and Engineering*. 2021. Vol. 55: 558–561. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.67.51.006>.
7. Bracho-Villavicencio C., Matthews-Cascon H., Rossi S. Artificial reefs around the world: A review of the state of the art and a meta-analysis of its effectiveness for the restoration of marine ecosystems. *Environments*. 2023. Vol. 10, no. 7: e121. <https://doi.org/10.3390/environments10070121>.
  8. Wang L., Liang Zh., Chai Z., Cong W., Zhu L., Guo Zh., Song M., Ma J., Guo T., Zhang W., Zheng W., Jiang Zh. Construction and evolution of artificial reef ecosystems: Response and regulation of marine microorganisms. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 367: e125610. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125610>.
  9. Yan J., Wei X., Si L., Zhang Z., Zhao J., Deng L., Tian T., Li Q., Yin Z., Wu Zh. Bacterial community composition and its relationship with environmental factors in the artificial reef area for marine ranching in Changhai County. *Animals*. 2025. Vol. 15, no. 5: e639. <https://doi.org/10.3390/ani15050639>.
  10. Voskoboynikov G.M., Ilyinskiy V.V., Lopushanskaya E.M., Makarov M.V., Pugovkin D.V., Ryzhik I.V., Lyaymer A.V., Yensen Dzh.B. Sanitarnaya vodoroslevaya plantatsiya dlya ochistki pribrezhnykh akvatoriy ot nefteproduktov: ot teorii k praktike [Sanitary algae plantation for the bioremediation of coastal waters from oil: From theory to practice]. *Voprosy sovremennoy al'gologii [Issues of Modern Algology]*. 2017. No. 3 (15): 1–25. (In Russian).
  11. Kuznetsov A.N. Zakonomernosti transformatsii neftyanogo zagryazneniya v vodnykh ekosistemakh : avtoref. dis. kand. geogr. nauk [Patterns of transformation of oil pollution in aquatic ecosystems. Extended abstract of Candidate's (Geography) Thesis]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet [Rostov State University] Publ., 2005. 27 p. (In Russian).
  12. Doroshenko Yu.V. Mikroflora akvatorii v rayone razmeshcheniya sistem gidrobiologicheskoy ochistki morskikh vod [Microflora in zone of hydrobiological cleaning systems' location]. *Ekologiya morya [Ecology of the Sea]*. 2007. Issue 73: 36–43. (In Russian).
  13. Biologicheskie aspekty neftyanogo zagryazneniya morskoy sredy [Biological aspects of oil pollution of the marine environment]. O.G. Mironov (ed.). Kyiv: Naukova dumka [Scientific Thought], 1988. 247 p. (In Russian).
  14. Praktikum po mikrobiologii : uchebnoe posobie [Practical training in microbiology. Study guide]. A.I. Netrusov (ed.). Moscow: Izdatel'skiy tsentr "Akademiya" [Publishing Center "Academy"], 2005. 608 p. (In Russian).
  15. Abed R.M.M., Al Fahdi Dh., Muthukrishnan T. Short-term succession of marine microbial fouling communities and the identification of primary and secondary colonizers. *Biofouling*. 2019. Vol. 35, issue 5: 526–540. <https://doi.org/10.1080/08927014.2019.1622004>.
  16. Kegler H.F., Lukman M., Teichberg M., Plass-Johnson J., Hassenrück Ch., Wild Ch., Gärdes A. Bacterial community composition and potential driving factors in different reef habitats of the Spermonde Archipelago, Indonesia. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8: e662. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00662>.
  17. Yao J., Zhu T., Liu H., Zhang Y., Ding G., Xin M.L., Nie M. Response of artificial reef microbiome of different materials to oil pollution. *The Journal of Fudan University (Natural Science)*. 2021. Vol. 60: 73–83.
  18. Burdiyan N.V., Doroshenko Yu.V. Dinamika chislennosti mikrobioty v perifitone gidrotekhnicheskogo sooruzheniya (Sevastopol', Chernoe more) [Dynamics of microbiota in the hydroengineering construction periphyton (Sevastopol, the Black Sea)]. In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy : materialy Vserossiyskoy nauchno-rakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, priurochennoy k 145-letiyu Sevastopol'skoy biologicheskoy stantsii (g. Sevastopol', 19–24 sentyabrya 2016 g.) [Marine biological research: achievements and perspectives. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 145<sup>th</sup> anniversary of Sevastopol Biological Station (Sevastopol, 19–24 September, 2016)]*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika [EKOSI-Hydrophysics], 2016. Vol. 2: 43–45. (In Russian).
  19. Yan J., Yue Yu., Lin Sh., Gu H., Han Z., Li Q., Tian T., Wei X., Wu Zh. Preliminary study on the structure of fungal communities in artificial reef areas in the Northern Yellow Sea. *Oceans*. 2025. Vol. 6, no. 1: e11. <https://doi.org/10.3390/oceans6010011>.
  20. Zhang Z., Guo H., Sun J., Gong X., Wang Ch., Wang H. Anaerobic phenanthrene biodegradation by a newly isolated sulfate-reducer, strain PheS1, and exploration of the biotransformation pathway. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 797: e149148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149148>.
  21. Dell'Anno F., Rastelli E., Sansone C., Brunet Ch., Ianora A., Dell'Anno A. Bacteria, fungi and microalgae for the bioremediation of marine sediments contaminated by petroleum hydrocarbons in the Omics era. *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, no. 8: e1695. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081695>.
  22. Rockne K.J., Strand S.E. Anaerobic biodegradation of naphthalene, phenanthrene, and biphenyl by a

- denitrifying enrichment culture. *Water Research*. 2001. Vol. 35, issue 1: 291–299. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00246-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00246-3).
23. Nazina T.N., Pavlova N.K., Tatarkin Y.V., Shestakova N.M., Babich T.L., Sokolova D.S., Ivoilov V.S., Tourova T.P., Belyaev S.S., Ivanov M.V., Khisametdinov M.R., Ibatullin R.R. Microorganisms of the carbonate petroleum reservoir 302 of the Romashkinskoe oilfield and their biotechnological potential. *Microbiology*. 2013. Vol. 82, no. 2: 190–200. <https://doi.org/10.1134/S0026261713020124>.
24. Burdiyan N.V. Anaerobnye bakterii perifitona bukhty Artilleriyskaya (Sevastopol', Chernoe more) [Anaerobic bacteria in the periphyton of Artilleriyskaya Bay (Sevastopol, the Black Sea)]. *Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana [Optimization and Protection of Ecosystems]*. 2014. No. 11 (30): 174–178. (In Russian).
25. Razumov V.A., Tyutyunova F.I. Nitritnoe zagryaznenie r. Moskvy: prichiny i sledstviya [Nitrite pollution of the Moscow River: Causes and consequences]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2001. No. 3: 356–366. (In Russian).
26. Sumampouw O.J., Risjani Y. Bacteria as indicators of environmental pollution: Review. *International Journal of Ecosystem*. 2014. Vol. 4, no. 6: 251–258. <https://doi.org/10.5923/j.ije.20140406.03>.

**Об авторах:**

**Дорошенко Юлия Валерьевна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории хемозкологии ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), ORCID 0000-0003-0498-3369, [doroshenko\\_yuv@ibss-ras.ru](mailto:doroshenko_yuv@ibss-ras.ru)

**Бурдиян Наталия Витальевна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории хемозкологии ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), ORCID 0000-0001-8030-1556, [burdiyan\\_nv@ibss-ras.ru](mailto:burdiyan_nv@ibss-ras.ru)

**Поступила в редакцию** 18.05.2025

**Поступила после рецензии** 17.06.2025

**Принята к публикации** 20.06.2025

*Конфликт интересов*

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант.*

**Received** 18.05.2025

**Revised** 17.06.2025

**Accepted** 20.06.2025

*Conflict of interest statement*

The authors do not have any conflict of interest.

*All authors have read and approved the final manuscript.*