

**Особенности распределения основных групп
бактерий – деструкторов органического вещества
в различных геохимических условиях
донных отложений прибрежных акваторий
южной части полуострова Камчатка**

**Г. В. Фролкин^{1*}, К. М. Зарипова², Е. А. Тихонова^{2,3},
Н. В. Бурдиян², Ю. В. Дорошенко², К. А. Селиванова⁴**

¹ Научно-исследовательский центр пресноводной и солоноватоводной
гидробиологии – филиал ФИЦ ИнБЮМ, Севастополь, Россия

² ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

³ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

⁴ Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия

* e-mail: egor.frolkin@ibss-ras.ru

Аннотация

Цель исследования – оценить уровень органического загрязнения прибрежных акваторий южной части полуострова Камчатка по микробиологическим и физико-химическим показателям донных отложений. В ходе экспедиции рейса 25/2 ПС «Профессор Мультиановский» (июль – август 2025 г.) на 16 станциях в северо-западной части Тихого океана и Охотском море отобраны пробы поверхностных донных отложений. Определены гранулометрический состав, содержание органического вещества методом потерь при прокаливании, физико-химические параметры придонной воды (температура, соленость, pH, окислительно-восстановительный потенциал), а также численность гетеротрофных и углеводородокисляющих бактерий методом предельных разведений. Установлено, что содержание органического вещества в илистых грунтах (5.0–14.7 %) значительно выше, чем в песчано-гравийных (менее 2.3 %), выявлена обратная зависимость между этим показателем и окислительно-восстановительным потенциалом ($r = -0.72$; $p < 0.01$). Численность гетеротрофных бактерий варьировала от 10^2 до 10^7 кл·г⁻¹, углеводородокисляющих – от 10 до 10^4 кл·г⁻¹.

© Фролкин Г. В., Зарипова К. М., Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В.,
Дорошенко Ю. В., Селиванова К. А., 2026



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

Максимальные значения численности обеих групп зафиксированы в Авачинской губе (10^7 и 10^3 кл·г⁻¹ соответственно) и рекреационных бухтах (Вилюченская, Лиственничная), что указывает на высокую антропогенную нагрузку. Минимальные значения (10^2 и 10 кл·г⁻¹) отмечены в фоновом районе устья р. Налычева. Выявлена положительная корреляция между численностью углеводородокисляющих бактерий и содержанием органического вещества ($\rho = 0.6$, $p < 0.05$), а также отрицательная связь численности обеих групп с окислительно-восстановительным потенциалом (для гетеротрофных бактерий $\rho = -0.7$, $p < 0.01$, углеводородокисляющих – $\rho = -0.8$, $p < 0.001$). Тип грунта статистически влияет на численность углеводородокисляющих бактерий ($p < 0.05$). Полученные данные подтверждают эффективность использования численности гетеротрофных и углеводородокисляющих бактерий в качестве биоиндикаторов органического загрязнения и отражают потенциал самоочищения исследованных акваторий.

Ключевые слова: донные отложения, гетеротрофные бактерии, углеводородокисляющие бактерии, прибрежные акватории, полуостров Камчатка, Охотское море

Благодарности: отбор проб в ходе научного рейса проводился в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет» по теме «Подготовка молодого кадрового резерва в области морских наук по научно-образовательной программе „Плавучий университет“ на основе комплексных исследований экосистемы дальневосточных морей России» (проекты № 075-03-2025-662/8 и № 075-03-2025-421/5). Подготовка питательных сред для определения численности индикаторных групп бактерий, пробоподготовка донных отложений, определение физико-химических характеристик донных отложений выполнены в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение биогеохимических закономерностей радиэкологических и хемо-экологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (№ гос. регистрации 124030100127-7). Определение содержания органического вещества в донных отложениях и анализ особенностей распределения индикаторных групп бактерий выполнены при поддержке Минобрнауки России в рамках направления «Экология и биоразнообразие Камчатки» Межведомственной программы исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий 2024–2026 гг., проект № FZNS-2024-0037 «Комплексный экологический мониторинг прибрежных морских и наземных экосистем Камчатки».

Для цитирования: Фролкин Г. В., Зарипова К. М., Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В. и др. Особенности распределения основных групп бактерий – деструкторов органического вещества в различных геохимических условиях донных отложений прибрежных акваторий южной части полуострова Камчатка // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 3. С. 139–155. EDN NKLUME.

Organic Matter–Destructing Bacteria in Bottom Sediments of the Southern Kamchatka: Distribution Patterns under Variable Geochemical Conditions

G. V. Frolkin^{1*}, K. M. Zaripova², E. A. Tikhonova^{2, 3},
N. V. Burdiyan², Yu. V. Doroshenko², K. A. Selivanova⁴

¹ Research Center for Freshwater and Brackish-Water Hydrobiology – Branch of the A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

² A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

³ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

⁴ Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia

* e-mail: egor.frolkin@ibss-ras.ru

Abstract

The paper aims to assess the organic pollution level of the coastal waters of the southern part of the Kamchatka Peninsula based on microbiological and physical and chemical parameters of bottom sediments. During cruise 25/2 aboard PV *Professor Multanovsky* (July–August 2025), samples of surface-layer bottom sediments were collected at 16 stations in the north-western Pacific Ocean and the Sea of Okhotsk. The grain size distribution, organic matter content (determined by the loss-on-ignition method), physical and chemical parameters of the bottom water (temperature, salinity, pH, redox potential), as well as the abundance of heterotrophic and hydrocarbon-oxidising bacteria (determined by the limiting dilution method) were determined. The study revealed that the organic matter content in silty soils (5.0–14.7%) was significantly higher than in sandy-gravelly soils (less than 2.3%); an inverse relationship was identified between this parameter and the redox potential ($\rho = -0.72$; $p < 0.01$). The abundance of heterotrophic bacteria ranged from 10^2 to 10^7 cells·g⁻¹, whilst that of hydrocarbon-oxidising bacteria ranged from 10 to 10^4 cells·g⁻¹. The highest abundance values for both groups were recorded in Avacha Bay (10^7 and 10^3 cl·g⁻¹, respectively) and in the recreational bays (Vilyuchenskaya, Listvennichnaya), indicating a high anthropogenic load. The minimum values (10^2 and 10 cells·g⁻¹) were recorded in the background area at the mouth of the Nalycheva River. A positive correlation was found between the abundance of hydrocarbon-oxidising bacteria and organic matter content ($\rho = 0.6$, $p < 0.05$), as well as a negative relationship was found between the abundance of both groups and the redox potential (for heterotrophic bacteria $\rho = -0.7$, $p < 0.01$; for hydrocarbon-oxidising bacteria $\rho = -0.8$, $p < 0.001$). The soil type has a statistically significant effect on the abundance of hydrocarbon-oxidising bacteria ($p < 0.05$). The results confirm the effectiveness of using heterotrophic bacteria and hydrocarbon-oxidizing bacteria abundance indicators as bioindicators of organic pollution and show the self-purification potential of the studied waters.

Keywords: bottom sediments, heterotrophic bacteria, hydrocarbon-oxidizing bacteria, coastal waters, Kamchatka Peninsula, Sea of Okhotsk

Acknowledgments: Sampling during the research cruise was carried out within the framework of the All-Russian scientific and educational program “Floating University” under the project “Training a young personnel reserve in marine sciences through the scientific and educational program ‘Floating University’ based on integrated studies of the ecosystems of the Russian Far Eastern seas” (projects No. 075-03-2025-662/8 and No. 075-03-2025-421/5). Preparation of culture media for assessing the abundance of indicator bacterial groups, pretreatment of bottom-sediment samples, and determination of the physical and chemical characteristics of bottom sediments were performed within the state assignment of the Federal Research Center

IBSS on the topic “Study of biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in aquatic ecosystems of the Azov–Black Sea basin in comparison with other areas of the World Ocean and selected aquatic ecosystems of their catchment basins to support sustainable development in the southern seas of Russia” (state registration No. 124030100127-7). Determination of organic matter content in bottom sediments and analysis of the distribution patterns of indicator bacterial groups were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the research area “Ecology and Biodiversity of Kamchatka” of the Interdepartmental Research Program of the Kamchatka Peninsula and Adjacent Waters for 2024–2026, project No. FZNS-2024-0037 “Integrated environmental monitoring of coastal marine and terrestrial ecosystems of Kamchatka.”

For citation: Frolkin, G.V., Zaripova, K.M., Tikhonova, E.A., Burdiyan, N.V., Doroshenko, Yu.V. and Selivanova, K.A., 2026. Organic Matter–Destructing Bacteria in Bottom Sediments of the Southern Kamchatka: Distribution Patterns under Variable Geochemical Conditions. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 139–155.

Введение

Прибрежные морские экосистемы играют ключевую роль в глобальном биогеохимическом цикле. Донные отложения морских прибрежных зон выступают в качестве основного аккумулятора органических загрязнителей, включая нефтепродукты и другие углеводородные соединения, поступающие в результате антропогенной деятельности (портовое хозяйство, судоходство, рекреация) и естественных процессов (речной сток, природные нефтепроявления) [1–3]. В условиях замедленного водообмена донные осадки становятся долговременным резервуаром загрязняющих веществ, что определяет особую экологическую значимость донных осадков как индикаторов техногенной нагрузки на морские экосистемы.

Оценка состояния донных отложений требует комплексного подхода, объединяющего физико-химические и микробиологические методы анализа. Физико-химические параметры придонного слоя (температура, соленость, pH, окислительно-восстановительный потенциал) формируют условия существования микробных сообществ и определяют направление биогеохимических трансформаций органического вещества (ОВ). В свою очередь, микробиологические показатели – численность гетеротрофных бактерий (ГБ) и углеводородокисляющих бактерий (УОБ) – также могут служить биоиндикаторами органического загрязнения и отражать потенциал самоочищения экосистемы [4–7]. При загрязнении водоемов увеличение численности бактерий определенных групп зачастую наблюдается раньше, чем может быть зафиксировано изменение химических показателей воды. Таким образом, микробиологические методы могут быть значительно чувствительнее санитарно-химических [8–10].

Несмотря на имеющиеся данные о состоянии прибрежных акваторий Камчатки, информация о количественном составе и распределении функциональных групп бактерий-деструкторов в донных отложениях остается фрагментарной [11], особенно при пространственном сопоставлении фоновых и антропогенно нагруженных районов. Поскольку часть исследованных станций расположена на судовой стоянке, где постоянно производится транспортировка и бункеровка топлива, в качестве модельного загрязнителя и единственного субстрата для микроорганизмов-деструкторов была выбрана нефть [12, 13].

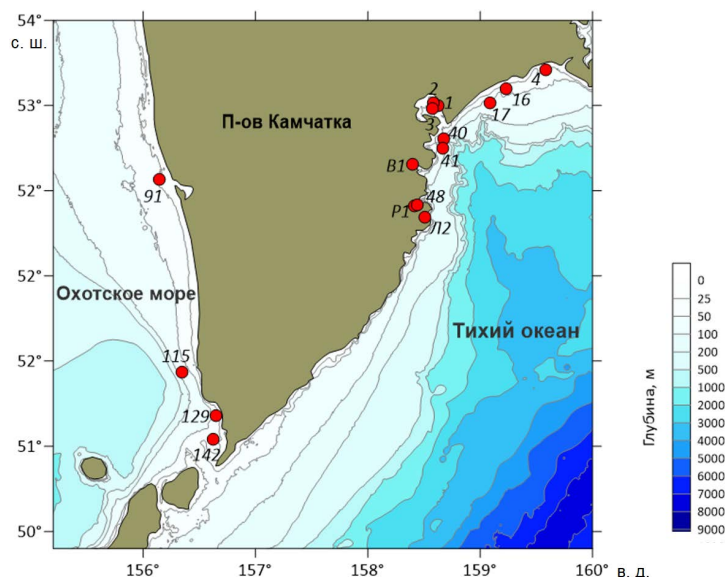
В настоящей работе впервые предпринято комплексное исследование пространственного распределения численности ГБ и УОБ в донных отложениях разнотипных прибрежных акваторий Камчатки, включая портовые зоны (Авачинская губа), рекреационные бухты (Вилючинская, Лиственничная) и фоновые участки (устье р. Налычева), с одновременным учетом гранулометрического состава осадков, содержания ОВ и ключевых физико-химических параметров придонной среды. Такой подход направлен на оценку уровня органического загрязнения и выявление факторов, определяющих пространственную неоднородность микробных сообществ.

Цель работы – изучить микробиологические и физико-химические характеристики донных отложений прибрежных акваторий северо-западной части Тихого океана и Охотского моря для оценки уровня органического загрязнения.

Материалы и методы

Работы проводили в летний период 2025 г. в рейсе пассажирского судна «Профессор Мультановский» в северо-западной части Тихого океана и Охотском море (рис. 1).

Всего выполнено 16 станций. Станции 1–3 расположены внутри Авачинской губы, ст. 4 – у устья рек Вахиль и Островной; ст. 16 – устье р. Налычева, где в 2020 г. были зафиксированы «красные приливы» [14; 15]; ст. 17 – вблизи Халактырского пляжа; ст. 40 – в проливе, соединяющем Авачинскую губу с океаном;



Р и с . 1 . Район исследования с указанием станций отбора проб донных отложений (красные кружки) в северо-западной части Тихого океана и Охотском море, 2025 г.

Fig. 1. Map of the sediment sampling stations (red dots) in the northwestern Pacific Ocean and the Sea of Okhotsk (2025)

ст. 41 – в б. Саранной; ст. В1 – акватория б. Вилючинской, куда впадают реки Вилюча и Жирова; ст. Р1 и ст. 48 – в б. Русской; ст. Л2 – в б. Лиственничной, куда впадает одноименная река; ст. 91 – напротив деревень Усть-Большерецк и Октябрьский; ст. 115 – вблизи устья р. Озерной у дер. Озерновский; ст. 129 – у м. Камбального, куда впадает одноименная река; ст. 142 – в зал. Марии, где находятся устья рек Кривой и Лысой. Станции у устьев рек были выбраны с учетом переноса с их водами ОВ. Кроме того, в местах впадения речных вод соленость несколько снижается, что может влиять на пространственное распределение микробиологического сообщества. Бухты характеризуются затрудненным водообменом, в результате чего концентрация ОВ резко увеличивается. Кроме того, бухты нередко служат местом стоянки судов и входят в туристические маршруты.

Пробы поверхностных донных отложений (верхний слой до 5 см) отбирали коробчатым дночерпателем. Сразу после отбора визуально оценивали физические свойства донных отложений и определяли тип морского грунта¹⁾. Температуру, соленость придонного слоя вод и глубину на станциях отбора проб определяли при помощи CTD-зонда. Водородный показатель (рН) и окислительно-восстановительный потенциал (Eh) измеряли с помощью рН-метра «Нитрон-рН» с термокомпенсатором. Для анализа отбирали верхний окисленный слой донных отложений.

Определение общего содержания ОВ в пробах донных отложений проводили методом потерь при прокаливании (ППП) по ГОСТ 23740-2016²⁾. Подготовка проб включала измельчение воздушно-сухих образцов и просеивание через сито с ячейей 0.2 мм. Аналитическую навеску массой 3–5 г в двух повторностях высушивали при $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ до постоянной массы, а затем прокаливали в муфельной печи. Прокаливание начинали с холодной печи, постепенно повышая температуру до $(525 \pm 25)^\circ\text{C}$, и выдерживали при этой температуре 3 ч до постоянной массы. Расчет PPP выполняли по разнице масс. Окончательным результатом служило среднее арифметическое двух параллельных определений, допустимое расхождение между которыми не превышало 10 %.

В пробах донных отложений определяли численность ГБ и УОБ методом предельных разведений с использованием жидких питательных сред³⁾. Для ГБ использовали среду с пептоном, для УОБ применяли среду Диановой – Ворошиловой. В качестве единственного источника углерода и энергии в каждую пробирку после посева вносили стерильную нефть в концентрации 1 %. Пробы обрабатывали не позднее 2 ч с момента отбора.

Первичную обработку данных и расчет коэффициентов корреляции проводили с использованием программного обеспечения *Microsoft Excel*. Статистическую обработку данных выполняли с использованием программного обеспечения R. Для оценки влияния факторов среды на численность бактерий в донных отложениях проведен корреляционный анализ. Основным методом

¹⁾ Методические указания по определению загрязняющих веществ в морских донных отложениях № 43 / под ред. С. Г. Орадовского. Москва : Гидрометеиздат, 1979. 36 с.

²⁾ ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ : введ. 2017.07.01. Москва : Стандартинформ, 2017. 9 с. (Межгосударственный стандарт).

³⁾ Практикум по микробиологии / под ред. А. И. Нетрусова. Москва : Академия, 2005. 608 с.

оценки данных о численности бактерий являлся непараметрический коэффициент Спирмена (ρ). Параметрический коэффициент Пирсона (r) применяли дополнительно для оценки линейной связи между переменными, распределение которых не противоречило условиям его применения [16–17]. Для оценки влияния типа грунта на бактериальную численность все станции были разделены на три группы на основе описания грунта в пробоотборной документации: 1) преимущественно илистые осадки; 2) песчаные (включая заиленный песок); 3) песчано-гравийные. Поскольку данные о численности не подчинялись нормальному распределению, для сравнения групп использовали непараметрический H -критерий Краскела – Уоллиса, а в случае обнаружения значимых различий их попарно сравнивали с поправкой Холма – Бонферрони (для контроля над частотой ошибок I рода при множественных сравнениях). Различия считали статистически значимыми при $p < 0.05$.

Результаты и обсуждение

Исследуемые группы бактерий были выделены из проб, отобранных в условиях широкого диапазона физико-химических параметров среды (таблица). На большинстве станций донные отложения были представлены песчаными грунтами с примесью ила. В зонах с затрудненным водообменом донные осадки

Физико-химические параметры придонного слоя воды и донных отложений на станциях отбора проб

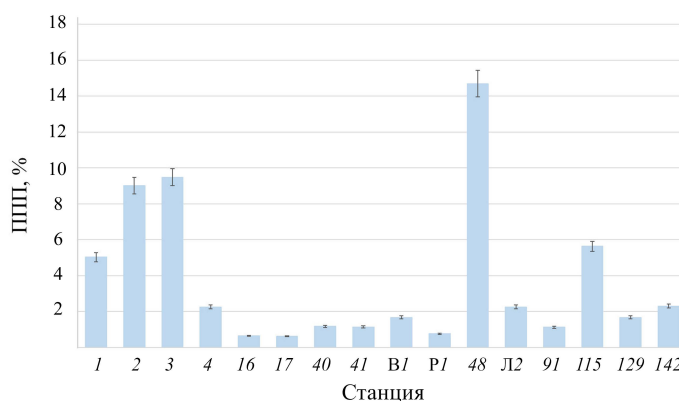
Physical and chemical properties of bottom water and sediments at sampling stations

Номер станции / Station number	t , °C	S, ЕПС / S, PSU	Глубина, м / Depth, m	pH	Eh, мВ / Eh, mV
1	3.0	29.7	23	7.5	–192
2	4.0	27.3	24	7.5	–385
3	2.6	31.8	26	7.6	–199
4	2.5	29.7	30	7.2	–35
16	1.2	32.9	41	7.7	+197
17	1.2	33.1	56	7.6	+192
40	1.4	33.9	62	7.5	+169
41	1.3	33.1	87	7.8	+104
B1	8.5	27.8	5	7.2	+53
P1	7.8	28.1	5	7.8	+129
48	2.7	32.4	32	7.4	–219
Л2	8.7	28.5	12	7.5	+61
91	9.9	29.0	25	8.2	+228
115	3.4	33.0	76	7.6	–30
129	6.6	32.4	37	7.5	+338
142	7.1	32.6	33	7.8	+284

чаще содержали повышенную долю мелкозернистой фракции (прил. А). Температура придонного слоя в ходе исследований колебалась от 1.2 до 9.9 °С. Минимальные значения были зафиксированы на ст. 16 (устье р. Налычева) и ст. 17 (Халактырский пляж). Соленость воды в придонном слое изменялась в диапазоне от 27.3 (в Авачинской губе) до 33.9 ЕПС (на выходе из губы). Водородный показатель рН варьировал от 7.2 до 8.2. Минимальные значения рН были отмечены в илистых грунтах б. Вилучинской, максимальные – в Охотском море около с. Усть-Большерецк и пгт Октябрьский. В среднем рН составил 7.7 (близко к нейтральным условиям среды), что способствует росту и развитию УОБ [18]. Окислительно-восстановительный потенциал Еh изменялся в широких пределах от –385 до +338 мВ. Минимальные значения зафиксированы в донных отложениях б. Вилучинской, а максимальное – напротив м. Камбального в Охотском море.

Анализ проб поверхностного слоя донных отложений, отобранных на 16 станциях в прибрежных акваториях Камчатки, выявил высокую пространственную вариабельность содержания ОВ (рис. 2). Значения варьируют в широком диапазоне от 0.6 % (ст. 17) до 14.7 % (ст. 48), что указывает на комплексное влияние локальных факторов на накопление и сохранение ОВ.

Одним из факторов, влияющих на накопление и сохранность ОВ в донных отложениях, является гранулометрический состав осадков ^{4), 5)} [19–21]. Наиболее высокие концентрации ОВ (от 5.0 до 14.7 %) зафиксированы в илистых грунтах (ст. 1–3, 48, 115). Мелкодисперсные частицы ила, обладая большой удельной



Р и с . 2 . Содержание органического вещества (потери при прокаливании, %) в поверхностных донных отложениях прибрежных акваторий п-ова Камчатка, 2025 г.

Fig . 2 . Content of organic matter in surface-layer bottom sediments of the coastal waters off the Kamchatka Peninsula, 2025. ППП – loss-on-ignition, %

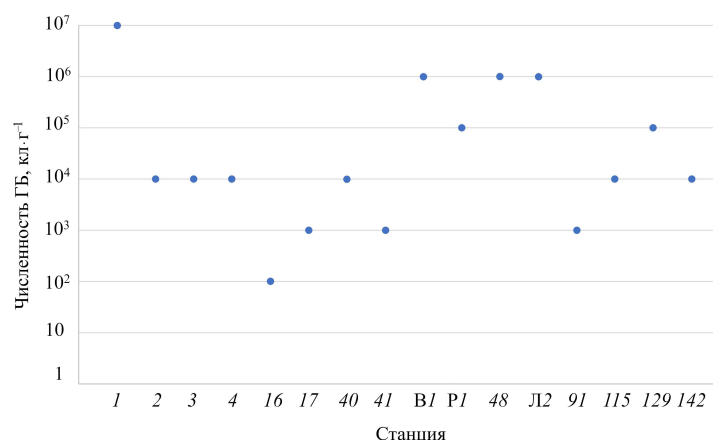
⁴⁾ Даувальтер В. А. Факторы формирования химического состава донных отложений озёр. Мурманск : Изд-во МГТУ, 2002. 75 с.

⁵⁾ Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане. Москва : Наука, 1977. 256 с.

поверхностью, эффективно сорбируют органический материал и создают условия для его захоронения. Напротив, в песчаных и гравийных отложениях, характерных для зон с высокой гидродинамической активностью (ст. 16, 17, P1, 91, 40, 41), содержание ОВ не превышало 2.3 %. Крупные частицы грунтов такого типа слабо способны удерживать ОВ, а хорошая аэрация способствует его быстрому окислению. Станции с переходными типами грунта (илистый песок, заиленный песок) – 4, Л2, 129, 142, В1 – демонстрировали промежуточные значения ППП (1.1–2.3 %), зависящие, по-видимому, от доли илистой фракции.

Для илистых фаций, где созданы предпосылки к аккумуляции ОВ, ключевым параметром, интегрально отражающим условия его сохранения, является окислительно-восстановительный потенциал. В исследованных отложениях наблюдалась устойчивая обратная зависимость ($r = -0.80$; $p < 0.001$; $\rho = -0.72$; $p < 0.01$): все станции с содержанием ОВ выше 5 % (ст. 1, 2, 3, 48, 115) характеризовались отрицательными значениями E_h (от -385 до -30 мВ), что свидетельствует о формировании восстановительных (анаэробных) условий. Эта связь была особенно выраженной на ст. 2, 3 и 48, где низкие значения E_h (до -385 мВ) сочетались с признаками присутствия сероводорода (характерный запах, примазки гидротроилита) и максимальными значениями ППП (9.0–14.7 %). Низкие значения окислительно-восстановительного потенциала в таких осадках могут являться следствием потребления кислорода на окисление ОВ и причиной резкого замедления его дальнейшей деградации, поскольку доминирующими становятся анаэробные процессы (например, сульфатредукция), эффективно консервирующие органический материал. Исключением из этой закономерности является станция В1 с илистыми грунтами, где, несмотря на благоприятную для аккумуляции ОВ структуру грунта, зафиксировано относительно низкое значение ППП (1.7 %) и положительное значение E_h ($+53$ мВ). Вероятно, это связано с малой глубиной в районе этой станции (5 м), поскольку волновое перемешивание и отсутствие устойчивой стратификации водной толщи препятствуют формированию восстановительных условий у дна.

Таким образом, распределение ОВ в исследованном районе формируется под действием нескольких взаимосвязанных факторов. Гидродинамический режим оказывает влияние на локализацию илистых (аккумулятивных) и песчано-гравийных (транзитных) фаций. Именно тонкодисперсный состав осадков создает предпосылки для сорбции и захоронения органического материала. Дополнительным фактором, увеличивающим поступление ОВ на дно, является антропогенная нагрузка. В б. Авачинской, подверженной хроническому загрязнению вследствие судоходства, поступления коммунально-бытовых и промышленных стоков, в илистые отложения поступает повышенное количество аллохтонного ОВ. Это приводит к увеличению содержания ОВ по сравнению с фоновыми акваториями со сходным гранулометрическим составом. Важную роль в сохранении высоких концентраций ОВ играют окислительно-восстановительные условия: в данном случае реализуется механизм положительной обратной связи – интенсивное поступление и накопление ОВ (как естественного, так и антропогенного происхождения) в илистых грунтах приводит к активному потреблению кислорода микроорганизмами и формированию восстановительных условий (отрицательные значения E_h на ст. 1–3, 48, 115).



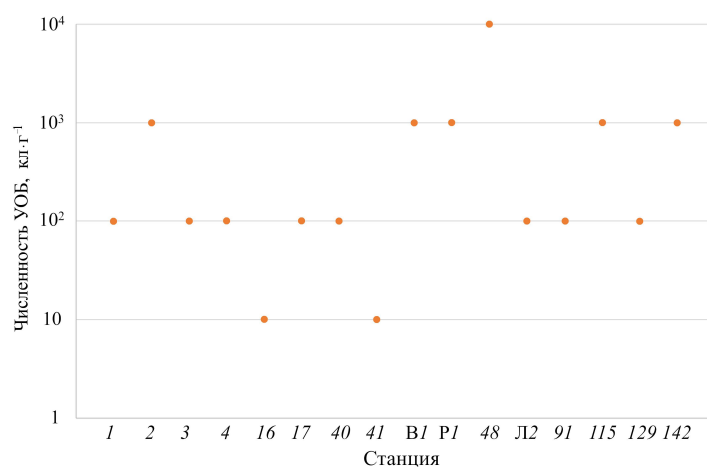
Р и с. 3. Численность гетеротрофных бактерий в поверхностном слое донных отложений на исследуемых станциях

Fig. 3. Abundance (cells·g⁻¹) of heterotrophic bacteria in the surface layer of bottom sediments at the study stations

Возникшая анаэробная обстановка, в свою очередь, резко замедляет дальнейшую деструкцию ОВ, способствуя его консервации.

Бактерии – деструкторы ОВ были обнаружены во всех пробах донных отложений (рис. 3). Численность ГБ варьировала от 10² до 10⁷ кл·г⁻¹. Максимальные ее значения зафиксированы в Авачинской губе (10⁷ кл·г⁻¹), а также в б. Вилучинской и Лиственничной (10⁶ кл·г⁻¹). В б. Авачинской (ст. 1) расположен один из крупнейших портов Камчатки, а б. Вилучинская и Лиственничная (ст. В1 и Л2 соответственно) имеют высокую рекреационную ценность. Высокие значения численности микроорганизмов в данных районах указывают на загрязнение вод органическими соединениями и способность микробных сообществ к их деструкции. Помимо этого, в бухтах расположены устья малых рек, потенциально являющихся источником ОВ для исследуемых акваторий. Минимальные значения численности ГБ выявлены в районе устья р. Налычева (10² кл·г⁻¹). Устье этой реки имеет самую большую площадь водосбора среди рек Авачинской группы вулканов и, вероятно, попадает в контур повышенной мутности речного шлейфа.

УОБ также выделены во всех исследуемых пробах (рис. 4), их численность варьировала в пределах от 10 до 10⁴ кл·г⁻¹. На половине исследованных станций количество УОБ составило 10² кл·г⁻¹. Минимальные значения зафиксированы на ст. 41 в б. Саранной и 16 в районе устья р. Налычева (10 кл·г⁻¹). Высокая численность УОБ (10³ кл·г⁻¹) фиксировалась в Авачинской губе, б. Вилучинской и Русской, в районе дер. Озерновский (ст. 115) и м. Марии (ст. 142). Максимальные показатели (10⁴ кл·г⁻¹) зафиксированы на ст. 48, которая находится в районе б. Русской. Высокая численность УОБ в данных районах может быть обусловлена высокой антропогенной нагрузкой на экосистему бухты вследствие рекреационной деятельности.



Р и с . 4 . Численность углеводородокисляющих бактерий в поверхностном слое донных отложений на исследуемых станциях

Fig. 4. Abundance (cells·g⁻¹) of hydrocarbon-oxidizing bacteria in the surface layer of bottom sediments at the study stations

Между общей численностью ГБ и УОБ в донных отложениях выявлена статистически значимая положительная корреляция (коэффициент ранговой корреляции Спирмена $\rho = 0.7$, $p = 0.005$). Наличие такой связи может указывать на совместное влияние общих абиотических факторов на обе группы, а также на возможные трофические взаимодействия или функциональную сопряженность в рамках микробного сообщества. Доля УОБ в общей численности ГБ варьировала в широких пределах – от 0.001 до 10 %. На шести станциях (ст. 2, 16, 17, 91, 115, 142) эта доля была максимальной и составила 10 %. Средняя по всем станциям доля УОБ составила около 3.8 %. Медианное значение доли УОБ от общей численности ГБ составило 1.0 %.

Статистический анализ не выявил значимой связи между численностью бактерий в донных отложениях и температурой придонной воды. В то же время обнаружена умеренная отрицательная корреляция между численностью ГБ и соленостью придонной воды ($\rho = -0.6$, $p < 0.05$), а также между численностью ГБ и глубиной ($\rho = -0.6$, $p < 0.05$). Полученные зависимости, по-видимому, носят опосредованный характер и отражают общие гидрологические и трофические условия. Пониженная соленость отмечена на прибрежных мелководных станциях: в их воды поступает материковый сток, который служит источником лабильного ОРВ и биогенных элементов, создающих условия для развития бактериального сообщества [22]. Для УОБ статистически значимых связей с соленостью и глубиной не обнаружено.

Корреляционный анализ выявил значимую положительную корреляцию между численностью УОБ и содержанием ОРВ (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.6$, $p < 0.05$; коэффициент ранговой корреляции Спирмена $\rho = 0.6$, $p < 0.05$). Для ГБ такой связи не выявлено.

Между окислительно-восстановительным потенциалом и численностью как ГБ ($\rho = -0.7, p < 0.01$), так и УОБ ($\rho = -0.8, p < 0.001$) выявлены отрицательные корреляции. Вероятно, данные корреляции косвенно отражают связь с типом грунта. Илистые осадки, характеризующиеся высокой удельной поверхностью частиц, имеют тенденцию к аккумуляции ОВ и формированию слабоаэрируемых восстановительных условий (низкие значения Eh). При этом обилие субстрата для адгезии и доступность ОВ могут создавать благоприятные условия для развития бактериальных сообществ. Значения pH в исследованном диапазоне не оказали значимого влияния на численность бактерий.

Статистический анализ (H -критерий Краскела – Уоллиса) выявил значимое влияние типа грунта на численность как ГБ ($H = 7.14, p = 0.028$), так и УОБ ($H = 8.55, p = 0.014$). Попарное сравнение с поправкой Холма – Бонферрони показало, что выраженные и достоверные различия наблюдаются для УОБ между илистыми и песчано-гравийными отложениями (тест Манна – Уитни, $p < 0.01$). Илистые грунты характеризуются более высокой численностью данной группы, а грубообломочные – наименьшими значениями [23, 24].

В сравнении с данными 2023–2024 гг. по представленному региону можно выявить некоторые общие пространственные закономерности распределения бактерий – деструкторов ОВ. Максимальная численность функциональных групп бактерий (ГБ и УОБ) в обоих исследованиях фиксируется в антропогенно нагруженных акваториях – Авачинской губе и рекреационных бухтах (Вилючинская, Лиственничная), что подтверждает роль этих бактерий как биоиндикаторов органического загрязнения [11]. Минимальные значения численности отмечаются в фоновых районах у устья р. Налычева. В донных отложениях численность бактерий варьирует в более широких пределах, чем в водной толще, что отражает роль донных осадков как основного аккумулятора ОВ и микроорганизмов. Оба исследования подтверждают эффективность использования численности ГБ и УОБ в качестве индикаторов уровня органического загрязнения прибрежных акваторий Камчатки.

Выводы

Численность ГБ в донных отложениях варьировала в широком диапазоне: от 10^2 до 10^7 кл·г⁻¹, а УОБ – от 10 до 10^4 кл·г⁻¹. Такая вариабельность отражает влияние локальных факторов: антропогенной нагрузки, гидродинамического режима и геохимических условий.

По результатам определения численности исследуемых групп бактерий самыми загрязненными по микробиологическим параметрам являются Авачинская губа и б. Вилючинская и Лиственничная, что обусловлено повышенной антропогенной нагрузкой и поступлением ОВ из рек. Высокая численность бактерий-деструкторов в этих районах свидетельствует как о поступлении органических загрязнителей (включая углеводороды), так и о сохранении потенциала самоочищения экосистемы.

Минимальные значения численности бактерий зафиксированы в фоновом районе устья р. Налычева (ГБ – 10^2 кл·г⁻¹, УОБ – 10 кл·г⁻¹), что в сочетании с низким уровнем содержания ОВ (0.68 %) в донных отложениях может свидетельствовать о минимальном антропогенном воздействии.

Илистые грунты (ст. 1–3, 48, 115) накапливают ОБ (5.0–14.7 % ППП) и поддерживают более высокую численность бактерий, чем песчано-гравийные отложения (< 2.3 % ППП).

Связь между локализацией портовых зон, рекреационных бухт и максимальной численностью УОБ подтверждает роль этих бактерий как биоиндикаторов нефтяного загрязнения. Пространственное соответствие повышенной численности изучаемых групп микроорганизмов зонам антропогенной активности позволяет рекомендовать численность ГБ и УОБ в донных отложениях в качестве биоиндикаторов экологического состояния прибрежных акваторий п-ова Камчатка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яцук А. В., Малицкий С. И., Гресов А. И., Швалов Д. А. и др. Газогеохимические аномалии углеводородных газов в донных осадках прилегающих акваторий восточной части полуострова Камчатка // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 521, № 2. С. 290–296. EDN QEACPI. <https://doi.org/10.31857/S2686739725040165>
2. Yatsuk A., Gresov A., Snyder G. T. Hydrocarbon gases in seafloor sediments of the edge shelf zone of the East Siberian Sea and adjacent part of the Arctic Ocean // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. 856496. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.856496>
3. Яцук А. В., Гресов А. И., Сергиенко В. И., Василенко Ю. П. и др. Газогеохимические аномалии углеводородных газов в донных осадках хребта Ломоносова и котловины Подводников Северного Ледовитого океана // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501, № 2. С. 219–225. EDN OQALFA. <https://doi.org/10.31857/S2686739721120161>
4. Еськова А. И., Пономарева А. Л., Легкодимов А. А., Шакиров Р. Б. и др. Распределение и характеристика микроорганизмов, участвующих в деструкции углеводородов в донных отложениях (обзор литературы) // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2021. № 3. С. 58–65. EDN TTZJDM. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-1-49-58-65>
5. Алекперова И. А. О роли нефтеокисляющих бактерий в самоочищении загрязненного нефтью Самур-Апшеронского шельфа Каспийского моря // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2009. № 2. С. 6–9. EDN LANPID.
6. Бузолева Л. С., Смирнова М. А., Безвербная И. П. Биологические свойства морских нефтеуглеводородоокисляющих бактерий из прибрежных акваторий дальневосточных морей с разным характером загрязнения // Известия ТИНРО. 2008. Т. 155. С. 210–218. EDN JVVQDB.
7. Atlas R. M., Bartha R. Hydrocarbon biodegradation and oil spill bioremediation // *Advances in microbial ecology*. Boston : Springer US, 1993. Vol. 12. P. 287–338. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7609-5_6
8. Немировская И. А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). Москва : Научный мир, 2013. 432 с.
9. Rojas-Vargas J., Esquivel-Hernández D. A., Moreira Uribe I., Hernandez-Valdes J. A., Gutierrez T., Vázquez-Rosas-Landa M. Frontiers and Advances in Marine Hydrocarbons Bioremediation // *Microbiological Challenges in the Energy Industries: Bridging the Gap between Renewables and Non-Renewables* / Edited by S. P. Kotu, T. L. Skovhus, K. Wunch. Boca Raton : CRC Press, 2025. P. 118–139. <https://doi.org/10.1201/9781003469643-8>

10. Corral-García L. S., Molina M. C., Bautista L. F., Simarro R. et al. Bacterial diversity in old hydrocarbon polluted sediments of Ecuadorian Amazon River basins // *Toxics*. 2024. Vol. 12, iss. 2. 119. <https://doi.org/10.3390/toxics12020119>
11. Зарипова К. М., Демидова Е. А., Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В. и др. Численность и распределение отдельных групп бактерий в воде прибрежной акватории полуострова Камчатка // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2025. № 2. С. 135–148. EDN VUFBCX.
12. Труднев С. Ю., Нистор А. С. Анализ аварийности судов рыбопромыслового флота Дальнего Востока // *Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. Материалы Второй международной научно-технической конференции (23–25 октября 2019 г.)*. Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2020. С. 66–69. EDN XYTWYU.
13. Шевцов М. Н., Макарова В. С. Оценка возможных негативных последствий от аварийного разлива нефтепродуктов на морской акватории в ходе операций по перегрузке грузов с барж // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2023. № 1. С. 153–160. EDN GXGKYS.
14. Санамян Н. П., Коробок А. В., Санамян К. Э. Качественная оценка последствий влияния вредоносного цветения водорослей осенью 2020 года у побережья юго-восточной Камчатки (северо-западная пацифика) на мелководные бентосные сообщества // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2023. № 63. С. 22–44. EDN GKLENO. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2023-63-22-44>
15. Khesina Z. B., Karnaeva A. E., Pytskii I. S., Buryak A. K. The mysterious mass death of marine organisms on the Kamchatka Peninsula: A consequence of a technogenic impact on the environment or a natural phenomenon? // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 166. 112175. EDN GSGHCL. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112175>
16. Баврина А. П., Борисов И. Б. Современные правила применения корреляционного анализа // *Медицинский альманах*. 2021. № 3. С. 70–79. EDN TPSSIX.
17. Котеров А. Н., Ушенкова Л. Н., Зубенкова Э. С., Калинина М. В. и др. Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2019. Т. 64, № 6. С. 12–24. EDN DAEYNG. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24>
18. Файзулина Э. Р., Татаркина Л. Г., Спанкулова Г. А., Баймаханова Г. Б. и др. Выделение и отбор микроорганизмов, перспективных для биоремедиации нефтезагрязненных экосистем в экстремальных условиях // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2024. № 9. С. 16–20. EDN LKUTOA. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13655>
19. Иванов Д. В., Валиев В. С., Зиганшин И. И., Шамаев Д. Е. и др. Структурная взаимосвязь гранулометрического состава, содержания органического вещества и тяжелых металлов в донных отложениях // *Российский журнал прикладной экологии*. 2020. № 2. С. 23–30. EDN YCQNW.
20. Mayer L. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1994. Vol. 58, iss. 4. P. 1271–1284. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90381-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90381-6)
21. Артемьев В. Е. Геохимия органического вещества в системе река-море. Москва : Наука, 1993. 204 с.
22. Lofthus S., Netzer R., Lewin A. S., Heggeset T. M. B. et al. Biodegradation of n-alkanes on oil–seawater interfaces at different temperatures and microbial communities associated with the degradation // *Biodegradation*. 2018. Vol. 29, iss. 2. P. 141–157. <https://doi.org/10.1007/s10532-018-9819-z>

23. Wang L., Liu X., Yu S., Shi X. *et al.* Bacterial community structure in intertidal sediments of Fildes Peninsula, maritime Antarctica // *Polar Biology*. 2017. Vol. 40, iss. 2. P. 339–349. <https://doi.org/10.1007/s00300-016-1958-2>
24. Nickels J. S., Bobbie R. J., Martz R. F., Smith G. A. *et al.* Effect of silicate grain shape, structure, and location on the biomass and community structure of colonizing marine microbiota // *Applied and environmental microbiology*. 1981. Vol. 41, iss 5. P. 1262–1268. <https://doi.org/10.1128/aem.41.5.1262-1268.1981>

Поступила 16.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 30.03.2026 г.;
принята к публикации 30.06.2026 г.; опубликована 30.09.2026 г.

Приложение А

Т а б л и ц а А 1 . Тип морского грунта ⁶⁾ на станциях отбора проб

T a b l e A 1 . Sediment types ⁶⁾ at sampling stations

Номер станции / Station number	Описание / Description
1	Темно-серый ил с примесью песка, полужидкий, вязкий / Dark gray silt with an admixture of sand, semi-liquid, viscous
2	Темно-серый с зеленоватыми пятнами ил, мягкий, вязкий, темные примазки, резкий запах сероводорода / Dark gray silt with greenish spots, soft, viscous, dark smears, strong hydrogen sulfide odor
3	Темно-серый с зеленоватыми пятнами ил, мягкий, вязкий, резкий запах сероводорода / Dark gray silt with greenish spots, soft, viscous, strong hydrogen sulfide odor
4	Темно-серый песчаный ил, плотный, пластичный, растительные остатки / Dark gray sandy silt, compact, plastic, plant remains
16	Темно-серый песок среднезернистый с примесью ила, мягкий, сыпучий, преобладание мелкого и среднего гравия, единичная мелкая и крупная галька / Dark gray medium-grained sand with an admixture of silt, soft, loose, dominance of fine- and medium-grained gravel, occasional fine- and coarse-grained pebbles
17	Темно-серый песок среднезернистый с примесью ила, мягкий, сыпучий, включения ракушки, преобладание мелкого и среднего гравия / Dark gray medium-grained sand with an admixture of silt, soft, loose, shell inclusions, dominance of fine- to medium-grained gravel
40	Темно-серый илистый песок, плотный, пластично-сыпучий, с примесью ракушки, с единичными включениями мелкого гравия / Dark gray silty sand, compact, plastic to loose, with an admixture of shells, with occasional fine-grained gravel inclusions

⁶⁾ Методические указания по определению загрязняющих веществ в морских донных отложениях № 43 / под ред. С. Г. Орадовского. Москва : Гидрометеиздат, 1979. 36 с.

Окончание табл. A1 / Table A1 (concluded)

Номер станции / Station number	Описание / Description
41	Темно-серо-коричневый ил, плотный, пластичный, включения ракушечного детрита / Dark grayish-brown silt, compact, plastic, shell detritus inclusions
B1	Темно-серый песок мелко- и среднезернистый / Dark gray fine- to medium-grained sand
P1	Темно-серый неоднородный со светлыми пятнами, ил, полужидкий, очень вязкий, сильный запах сероводорода / Dark gray heterogeneous silt with light spots, semi-liquid, very viscous, strong hydrogen sulfide odor
48	Темно-серый илистый песок, мягкий, сыпучий, с запахом разложения / Dark gray silty sand, soft, loose, with decomposition odor
L2	Темно-серый средний и мелкий гравий, мягкий, сыпучий, водоросли, единичные бентосные организмы, включения ракушки / Dark gray medium- to fine-grained gravel, soft, loose, algae, occasional benthic organisms, shell inclusions
91	Темно-серый ил, мягкий, вязкий / Dark gray silt, soft, viscous
115	Темно-серый песок заиленный, мягкий, сыпучий, включения ракушечного детрита / Dark gray silty sand, soft, loose, shell detritus inclusions
129	Темно-серый песок заиленный, мягкий, пластичный, включения ракушечного детрита / Dark gray silty sand, soft, plastic, shell detritus inclusions
142	Темно-серо-коричневый ил, плотный, пластичный, включения ракушечного детрита / Dark grayish-brown silt, compact, plastic, shell detritus inclusions

Об авторах:

Фролкин Георгий Витальевич, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Научно-исследовательский центр пресноводной и солоноватоводной гидробиологии» – филиал ФИЦ ИнБЮМ (299011, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0009-0002-2260-5230**, **ResearcherID: NIU-5117-2025**, **SPIN-код: 7263-8645**, egor.frolkin@ibss-ras.ru

Зарипова Ксения Маратовна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0009-0001-1160-4139**, **Scopus Author ID: 59173430600**, **ResearcherID: GWV-4575-2022**, **SPIN-код: 4535-0790**, zaripova_km@ibss-ras.ru

Тихонова Елена Андреевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2); Дальневосточный федеральный университет (690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9137-087X**, **Scopus Author ID: 57208495804**, **ResearcherID: X-8524-2019**, **SPIN-код: 3786-7334**, tihonoval@mail.ru

Бурдиян Наталия Витальевна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-8030-1556**, **Scopus Author ID: 57208497483**, **ResearcherID: AAD-1704-2022**, **SPIN-код: 5663-1151**, burdiyan@mail.ru

Дорошенко Юлия Валерьевна, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0498-3369**, **Scopus Author ID: 57211643141**, **ResearcherID: AAD-1706-2022**, **SPIN-код: 3643-9300**, julia_doroshenko@mail.ru

Селиванова Катерина Андреевна, магистрант, ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена» (191186, г. Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 48), katarina1107@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Фролкин Георгий Витальевич – написание и оформление статьи, обоснование исследования и подготовка литературного обзора, отбор проб, микробиологические работы по определению численности индикаторных групп бактерий, обработка и описание результатов исследования, анализ и обсуждение результатов

Зарипова Ксения Маратовна – разработка концепции, написание и оформление статьи, обоснование исследования и подготовка литературного обзора, построение графического материала, обработка и описание результатов исследования, анализ и обсуждение результатов

Тихонова Елена Андреевна – разработка концепции, постановка целей и задач исследования, обсуждение результатов, обоснование исследования, отбор проб

Бурдиян Наталия Витальевна – описание методики, обсуждение результатов, изготовление питательных сред

Дорошенко Юлия Валерьевна – описание методики, обсуждение результатов, изготовление питательных сред

Селиванова Катерина Андреевна – отбор проб, микробиологические работы по определению численности индикаторных групп бактерий, определение содержания органического вещества в донных отложениях

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.