

Научная статья

УДК 504.4:574.5 (265.5)

EDN: SAWKVI

Органическое вещество и нефтяные углеводороды в донных отложениях прибрежной акватории южной части полуострова Камчатка

К. М. Зарипова¹, К. И. Гуров², ✉, Е. А. Тихонова¹, О. В. Соловьёва¹

¹ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ gurovki@gmail.com

Поступила в редакцию 24.02.2026; одобрена после рецензирования 10.03.2026;
принята к публикации 20.05.2026.

Аннотация

Цель. Оценить содержание и пространственное распределение органического вещества и нефтяных углеводородов в поверхностном слое донных отложений прибрежных акваторий южной части п-ова Камчатка в зависимости от гранулометрического состава осадков и степени урбанизации побережья – цель настоящей работы.

Методы и результаты. В августе – сентябре 2023 г. на НИС «Профессор Мультиановский» отобраны пробы поверхностного слоя (0–3 см) донных отложений бокс-корером. Определены гранулометрический состав (комбинированный ситовой метод), потери при прокаливании по ГОСТ 23740-2016, содержание органического углерода ($C_{орг}$) кулонометрическим методом, и хлороформ-экстрагируемых веществ и нефтяных углеводородов весовым и ИК-методом. Донные отложения представлены преимущественно илисто-песчаным материалом с повышенной долей илов в изолированных бухтах. Содержание $C_{орг}$ изменялось в диапазоне 0,02–3,56 %, потери при прокаливании – в диапазоне 0,86–9,87 % при сильной корреляции между показателями ($r = 0,91$). Концентрации нефтяных углеводородов и хлороформ-экстрагируемых веществ составляли 0,3–93 и 2–185 мг/100 г соответственно, максимумы отмечены в Авачинской губе. Минимальные концентрации (0,3–3,2 мг/100 г для нефтяных углеводородов и 2–8 мг/100 г для хлороформ-экстрагируемых веществ) отмечались в песчаных отложениях на участке в районе Халактырского пляжа, а также в илистых отложениях Вилочинской бухты. Значения нефтяных углеводородов и хлороформ-экстрагируемых веществ положительно коррелировали с $C_{орг}$ и потерями при прокаливании. Линейная регрессионная модель показала, что потери при прокаливании и индекс урбанизации совместно объясняют около 80 % вариации $ln(HU)$.

Выводы. Показано, что содержание органического вещества и гранулометрический состав осадков являются ключевыми факторами аккумуляции нефтяных углеводородов, а урбанизация побережья усиливает углеводородную нагрузку. Авачинская губа и ряд мелководных бухт характеризуются признаками хронического загрязнения.

Ключевые слова: донные отложения, гранулометрический состав, органическое вещество, органический углерод, нефтяные углеводороды, загрязнение акватории, урбанизация, Камчатский полуостров, Авачинская губа

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-27-00613 «Органическое вещество донных отложений прибрежных акваторий с различным уровнем урбанизации побережья (п-ов Крым, Черное море и п-ов Камчатка, Тихий океан, Охотское море)». Авторы благодарят И. А. Забегаяева за помощь в анализе проб донных отложений на содержание в них органического углерода.

© Зарипова К. М., Гуров К. И., Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., 2026

Для цитирования: Органическое вещество и нефтяные углеводороды в донных отложениях прибрежной акватории южной части полуострова Камчатка / К. М. Зарипова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 4. С. 556–570. EDN SAWKVI.

Original article

Organic Matter and Petroleum Hydrocarbons in the Bottom Sediments of Coastal Waters of the Southern Kamchatka Peninsula

K. M. Zaripova ¹, K. I. Gurov ^{2,✉}, E. A. Tikhonova ¹, O. V. Soloveva ¹

¹ A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, Russia

² Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ gurovki@gmail.com

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to assess the content and spatial distribution of organic matter and petroleum hydrocarbons in the surface layer of bottom sediments in the coastal waters of the southern Kamchatka Peninsula depending on the sediment grain-size composition and the degree of coastal urbanization.

Methods and Results. The surface (0–3 cm) sediment samples were collected by a box corer from board the R/V “Professor Multanovskiy” in August – September 2023. The following parameters were determined: grain-size composition – by a combined sieve method, loss on ignition – according to GOST 23740-2016, organic carbon (C_{org}) content – by coulometric analysis, and concentrations of chloroform-extractable substances and petroleum hydrocarbons – by gravimetric and IR spectrometry. The sediments consisted predominantly of silt-sand mixtures, with higher silt content in the isolated bays. Content of C_{org} ranged from 0.02 to 3.56 %, and loss on ignition – from 0.86 to 9.87 % at strong correlation between the indices ($r = 0.91$). The concentrations of petroleum hydrocarbons and chloroform-extractable substances constituted 0.3–93 and 2–185 mg/100 g, respectively, and their maxima were observed in Avacha Bay. The minimum concentrations (0.3–3.2 mg/100 g for petroleum hydrocarbons and 2–8 mg/100 g for chloroform-extractable substances) were noted in sandy sediments in the Khalaktyrsky beach area, as well as in silt sediments of Vilyuchinskaya Bay. The values both of petroleum hydrocarbons and chloroform-extractable substances positively correlated with C_{org} and loss on ignition. The linear regression model has demonstrated that loss on ignition and the urbanization index jointly explain about 80 % of the variation in ln(PHC).

Conclusions. The obtained results show that the organic matter content and the grain-size composition of sediments are the key factors conditioning petroleum hydrocarbon accumulation, while coastal urbanization enhances the hydrocarbon load. The signs of chronic pollution are characteristic of Avacha Bay and several shallow bays.

Keywords: bottom sediments, grain-size composition, organic matter, organic carbon, petroleum hydrocarbons, marine pollution, urbanization, Kamchatka Peninsula, Avacha Bay

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the RSF project No. 25-27-00613 “Organic matter of bottom sediments of coastal water areas with different degrees of coastal urbanization (Crimea Peninsula, Black Sea, Kamchatka Peninsula, Pacific Ocean, and Sea of Okhotsk)”. The authors are thankful to I. A. Zabegaev for his assistance in analyzing the bottom sediment samples for organic carbon content.

For citation: Zaripova, K.M., Gurov, K.I., Tikhonova, E.A. and Soloveva, O.V., 2026. Organic Matter and Petroleum Hydrocarbons in the Bottom Sediments of Coastal Waters of the Southern Kamchatka Peninsula. *Physical Oceanography*, 33(4), pp. 584-597.

Введение

Прибрежные акватории южной части п-ова Камчатка представляют собой системы, находящиеся под воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Эти зоны служат важными буферами между континентом и морем, аккумулируя вещества, поступающие с материковым стоком, атмосферными осадками и в результате хозяйственной деятельности человека [1]. Донные отложения (ДО) выполняют роль долговременного депо загрязняющих веществ, где протекают процессы их аккумуляции, трансформации и частичной ремобилизации [2, 3]. Наиболее информативным для оценки современного состояния акватории является поверхностный слой ДО (0–3 см), поскольку именно в нем накапливаются свежие поступления загрязняющих веществ и протекают активные процессы седиментации.

Рост урбанизации прибрежных территорий увеличивает поступление загрязняющих веществ – тяжелых металлов, нефтяных углеводородов (НУ) и органического вещества антропогенного происхождения – в ДО [4–7]. Геохимические исследования показывают, что урбанизированные побережья характеризуются существенно более высокими уровнями загрязнения ДО по сравнению со слабо освоенными участками [4, 8]. Подобные закономерности выявлены и для побережья Камчатского п-ова, где влияние хозяйственной деятельности особенно выражено в районах городских агломераций и портовых зон, таких как Авачинская губа [9, 10].

Прибрежные районы являются критически важными зонами взаимодействия, на которые приходится 15 % глобальной продуктивности и более 80 % общего объема захоронения органического вещества [1]. Органическое вещество играет ключевую роль в формировании химического состава и свойств ДО, влияя на процессы сорбции, комплексобразования и удержания загрязнителей [11, 12]. Оно может влиять на физико-химические условия среды, способствовать формированию восстановительных зон и существенно изменять подвижность металлов и углеводородов [2, 11]. Установлено также, что содержание органического углерода и нефтяных углеводородов положительно коррелирует с долей тонкодисперсных фракций [13–17], что подтверждает роль данных фракций и органических веществ как сорбционной матрицы для загрязняющих веществ.

Ряд исследований указывает на прямую зависимость между уровнем урбанизации побережья и степенью загрязнения ДО [4, 18]. В районах с развитой инфраструктурой, интенсивным судоходством и сбросом сточных вод наблюдаются превышения фоновых значений нефтяных углеводородов, меди, цинка и свинца [9, 19]. Таким образом, пространственное распределение органического вещества и сопряженных загрязнителей может рассматриваться как индикатор уровня антропогенной нагрузки и степени урбанизации прибрежной зоны [20].

Целью данного исследования является изучение пространственного распределения органического вещества и нефтяных углеводородов в ДО прибрежных акваторий южной части п-ова Камчатка в зависимости от гранулометрического состава осадков, а также выявление связи между их содержанием и степенью урбанизации побережья.

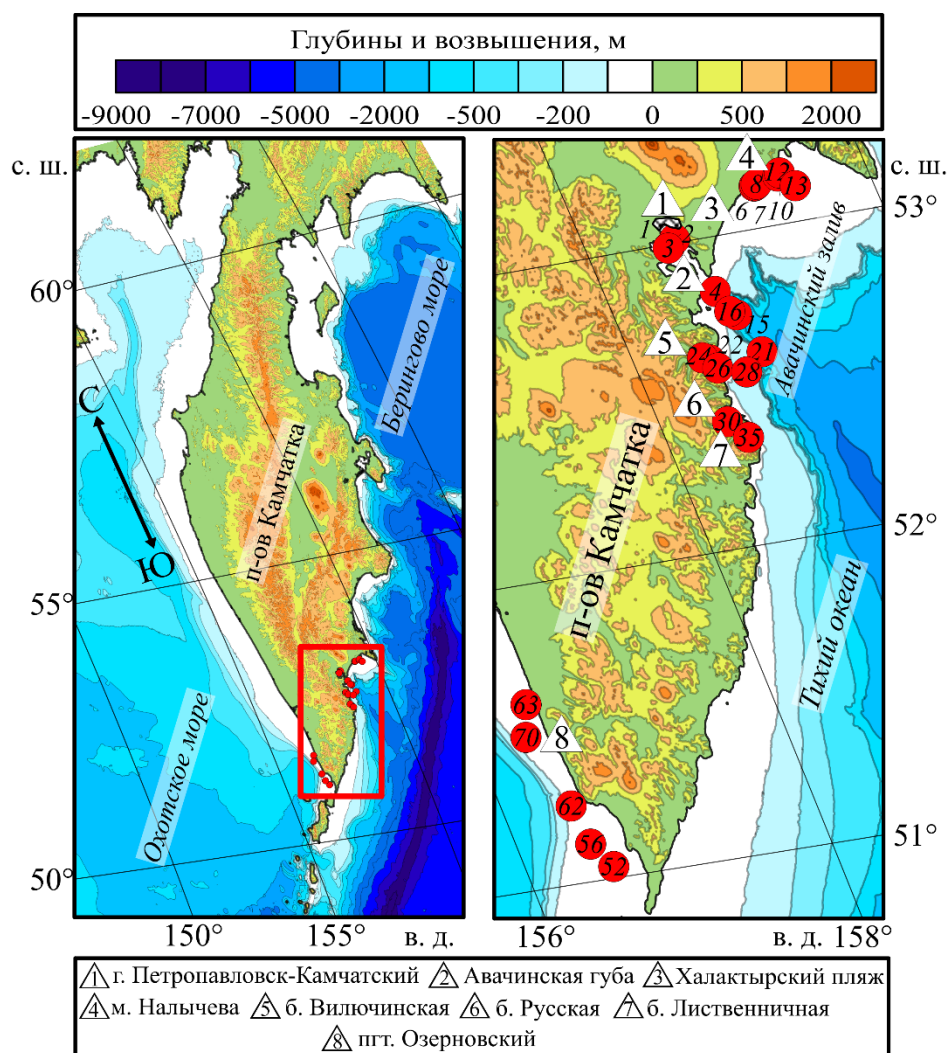
Материалы и методы

Работы проводились в период с 15 августа по 20 сентября 2023 г. в рейсе № 23/4 научно-исследовательского судна «Профессор Мультановский» в юго-восточных (Тихий океан) и юго-западных (Охотское море) акваториях п-ова Камчатка в рамках научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06). Расположение станций отбора проб ДО показано на рис. 1.

В работе приведены результаты анализа проб поверхностного слоя (0–3 см) ДО, отобранных при помощи бокс-корера. Гранулометрический состав ДО определяли комбинированным ситовым методом с разделением на фракции по стандартному набору сит (диаметр отверстий 10, 7, 5, 2,5, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,1, 0,05 мм, ГОСТ 12536-2014). Фракции крупнее 0,05 мм выделяли методом сухого рассева. Пелито-алевритовая фракция ($\leq 0,05$ мм) отделялась методом мокрого просеивания с последующим гравиметрическим определением ее сухой массы.

Общее содержание органического вещества в ДО определяли методом потерь при прокаливании (ППП) (ГОСТ 23740-2016). Для анализа воздушно-сухие пробы перетирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром ячеек 0,2 мм. Масса анализируемой навески составляла 3–5 г. Подготовленные тигли с пробами грунтов в двух повторностях, предварительно высушенными при (105 ± 2) °С до постоянной массы, помещали в холодную муфельную печь, температуру постепенно повышали до значения (525 ± 25) °С, и прокаливали в течение трех часов до достижения постоянной массы. Значение PPP рассчитывали по разнице масс. За окончательный результат анализа принимали среднее арифметическое результатов двух параллельных определений. Погрешность результатов параллельных определений не превышала 2,5 % от средней определяемой величины.

Определение содержания органического углерода $C_{\text{орг}}$ проводили на экспресс-анализаторе АН-7529М методом автоматического кулонометрического титрования. Принцип действия анализатора основан на сжигании навески пробы в потоке очищенного кислорода, поглощении образовавшегося диоксида углерода (CO_2) в электролитическом растворе ячейки и последующей автоматической компенсации изменения кислотности (pH) этого раствора путем электролиза. В соответствии с адаптированной для морских осадков методикой [21] навеску пробы массой 0,25 г смешивали с каталитическим ускорителем горения – 0,25 г оксида кобальта (Co_3O_4). Общая масса навески не превышала 0,5 г. Эмпирически подобранное время сжигания проб составляло три минуты. Анализ каждой пробы проводили в двукратной аналитической повторности. В качестве контроля применяли сертифицированный стандартный образец (ГСО 5359-90 (ООКО152)). Контроль точности и воспроизводимости метода показал следующее: среднеквадратическое отклонение для проб с низким содержанием органического углерода ($C_{\text{орг}} < 0,5$ %) составляло 0,03 %, для отложений с повышенным содержанием ($C_{\text{орг}} > 1,5$ %) – 0,083 %.



Р и с. 1. Район исследования (показан красным прямоугольником на фрагменте слева) и схема станций отбора проб донных отложений (справа)

F i g. 1. Study area (shown as a red rectangle in the left fragment) and diagram of the sediment sampling stations (right)

В соответственно подготовленных воздушно-сухих пробах ДО определяли весовым методом, нефтяных углеводородов – методом ИК-спектрии с использованием инфракрасного фурье-спектрометра ФСМ-1201 (ЗАО «ИнфраСпек», Россия) по методике Орадовского¹. Метод основан на экстракции углеводородов четыреххлористым углеродом (CCl_4), очистке полученного экстракта на колонке с оксидом алюминия (Al_2O_3) для отделения неполярных нефтяных фракций и последующем измерении оптической плотности в ИК-спектре.

¹ Руководство по методам химического анализа морских вод / под ред. С. Г. Орадовского. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. 208 с.

Статистические расчеты и построение регрессионной модели выполняли в программной среде *R*, версия 4.3.1 (*R Foundation for Statistical Computing*, Вена, Австрия). Для оценки влияния антропогенной нагрузки и свойств донных осадков на содержание НУ была использована линейная регрессионная модель. Коэффициенты модели оценивали методом наименьших квадратов.

В качестве зависимой переменной использовали натуральный логарифм концентраций НУ, что позволило снизить асимметрию распределения данных и улучшить соответствие предпосылкам линейной регрессии:

$$\ln(\text{НУ}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Urban} + \beta_2 \cdot \text{ППП},$$

где *Urban* – категориальный показатель антропогенной нагрузки побережья; ППП – содержание органического вещества, определенное методом потери при прокаливании, %.

Показатель *Urban* рассчитывали на основе минимального расстояния от станции отбора проб до ближайшего элемента прибрежной инфраструктуры – населенного пункта или порта. Полученный градиент интерпретировали как категориальную шкалу антропогенной нагрузки: 0 – фоновые районы (> 60 км), 1 – слабо нагруженные районы (30–60 км), 2 – умеренно нагруженные районы (10–30 км), 3 – сильно нагруженные зоны (≤ 10 км). Такое деление использовали как приближенную оценку пространственного градиента антропогенного воздействия, связанного с удаленностью станций от основных прибрежных источников загрязнения. Подходы, основанные на учете расстояния до урбанизированных территорий и объектов инфраструктуры, применяются для оценки антропогенного воздействия на прибрежные экосистемы [22, 23]. Пороговые значения расстояний были выбраны с учетом масштаба района исследования и распределения станций относительно населенных пунктов и портовой инфраструктуры.

При подборе итоговой модели рассматривали также $S_{\text{орг}}$, гранулометрический состав и глубину. Сравнение моделей проводили с учетом скорректированного коэффициента детерминации, информационного критерия Акаике (*AIC*) [24], статистической значимости коэффициентов и наличия мультиколлинеарности между предикторами.

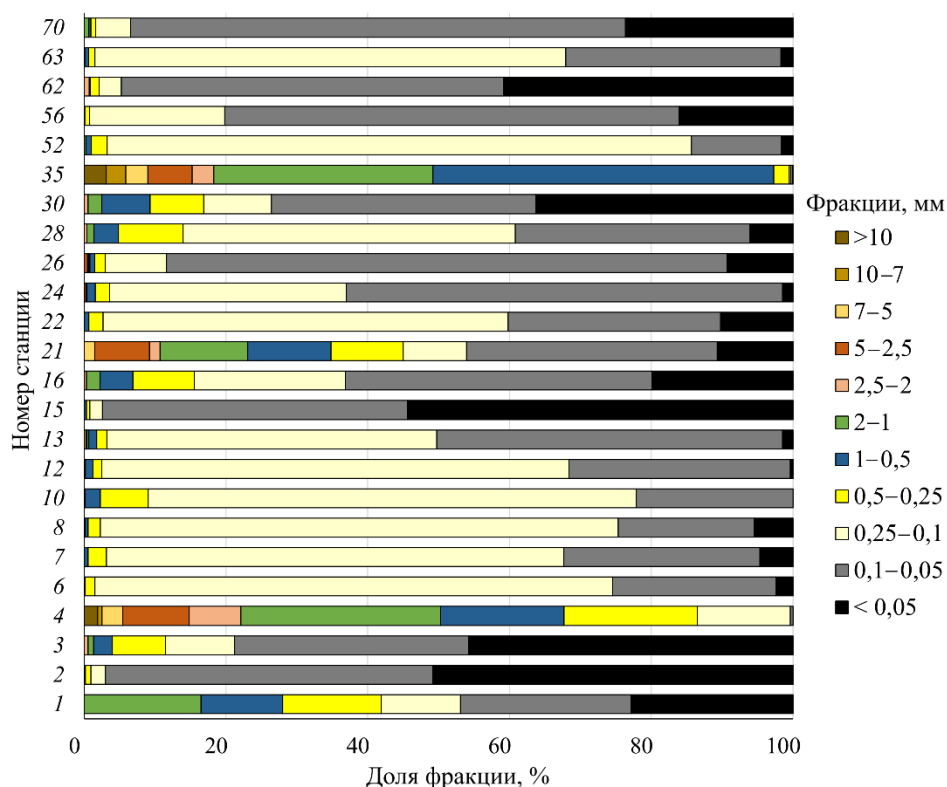
Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что по гранулометрическому составу ДО представлены илисто-песчаным материалом (средняя доля илистой фракции составила 52 %, песчаной – 42 %) с незначительными локальными включениями крупнозернистого гравийного материала (средняя доля 6 %) (рис. 2).

Как видно на рис. 3, содержание органического вещества в поверхностном слое ДО демонстрирует значительную пространственную вариабельность между станциями отбора, что свидетельствует о неоднородности условий аккумуляции и трансформации органического материала в донных отложениях исследуемых акваторий.

Содержание $S_{\text{орг}}$ в ДО исследованных прибрежных акваторий южной части п-ова Камчатка изменялось в пределах 0,02–3,56 %, что обусловлено как

литологической и гранулометрической неоднородностью субстрата, так и различной степенью антропогенного воздействия (рис. 3). Минимальные значения ($< 0,1\%$) характерны для песчаных отложений открытых участков у Халактырского пляжа (ст. 6–8) и м. Налычева (ст. 10–12), тогда как максимальные значения ($> 2\%$) зафиксированы в зонах с преобладанием тонкодисперсного пелитового материала – в Авачинской губе и б. Русская (ст. 1–3, 30). Это подтверждается прямой высокой линейной корреляционной зависимостью ($r = 0,82$, $n = 23$).



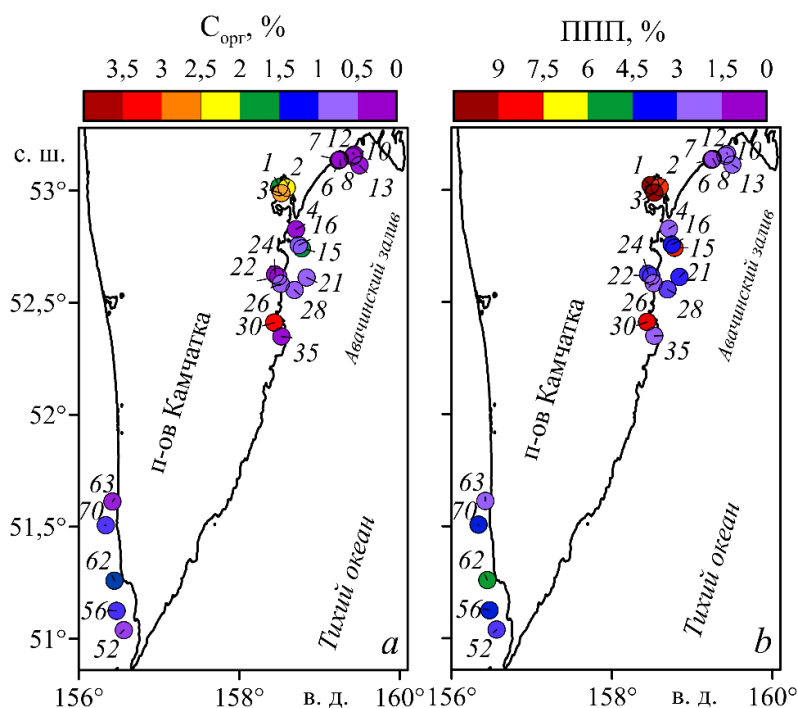
Р и с. 2. Диаграмма гранулометрического состава поверхностного слоя донных отложений в прибрежных акваториях п-ова Камчатка, 2023 г.

F i g. 2. Diagram of grain-size composition of the surface layer of bottom sediments in the coastal waters of Kamchatka Peninsula, 2023

Значения ППП изменялись в диапазоне 0,86–9,87 % с высоким уровнем положительной корреляции между ППП и содержанием $C_{орг}$ ($r = 0,91$, $n = 23$), что указывает на их в определенной степени взаимозаменяемость при оценке степени органического обогащения осадков. Это также подтверждается соотношениями между величинами ППП и долями фракций гранулометрического состава: 0,6 для ила, 0,1 для алеврита и 0,9 для пелита. Для гравийного и песчаного материала эти соотношения отрицательные, $-0,1$ и $-0,6$ соответственно.

Высокие значения $C_{орг}$ и ППП типичны для акваторий, подверженных постоянному поступлению аллохтонного органического вещества с речным стоком и сточными водами, а также для зон с ограниченным водообменом, где

происходит аккумуляция тонкодисперсного материала [17]. Аналогичные закономерности отмечались и в других прибрежных экосистемах северной части Тихого океана [25, 26].



Р и с. 3. Содержание C_{org} (a) и ППП (b) в поверхностном слое донных отложений прибрежных акваторий п-ова Камчатка, 2023 г.

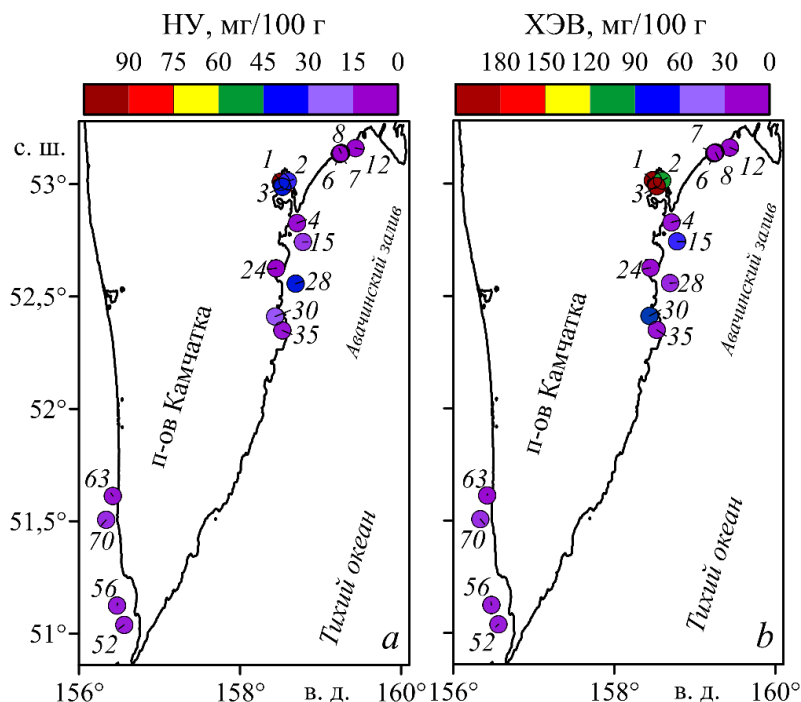
Fig. 3. Content of C_{org} (a) and LOI (b) in the surface layer of bottom sediments in the coastal waters of Kamchatka Peninsula, 2023

Концентрации хлороформ-экстрагируемых веществ изменялись в диапазоне 2–185 мг/100 г воздушно-сухого вещества, нефтяных углеводородов – в диапазоне 0,3–93 мг/100 г (рис. 4). Максимальные значения для обоих показателей зафиксированы в ДО Авачинской губы (ст. 1–3), что соответствует зонам максимального антропогенного воздействия и совпадает с ранее опубликованными данными регионального экологического мониторинга ².

Повышенные значения также отмечались на ст. 15 и 30, что объясняется типом донных отложений (зеленовато-серый ил с черными примазками) и повышенным содержанием пелитовых илов (36–54 %) и органического вещества (C_{org} – 1,5–3,6 %, ППП – 7,3–7,8 %). Минимальные концентрации (0,3–3,2 мг/100 г для НУ, 2–8 мг/100 г для ХЭВ) отмечались в песчаных отложениях на участке в районе Халактырского пляжа, а также в илистых отложениях Вилучинской бухты (ст. 24). Если в первом случае пониженные значения НУ

² Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2022 году. Петропавловск-Камчатский : Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края, 2023. 418 с. URL: <https://minprir.kamgov.ru/files/64f55ac61dac00.85925865.pdf> (дата обращения: 07.07.2026).
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 42 № 4 2026 563

и ХЭВ могут объясняться типом отложений и его пониженной сорбционной емкостью, то во втором случае они могут указывать на низкий уровень антропогенной нагрузки в данной бухте, поскольку отложения в ней преимущественно тонкодисперсные (доля илистой фракции 63 %) (рис. 2).



Р и с. 4. Содержание НУ (а) и ХЭВ (b) в поверхностном слое донных отложений прибрежных акваторий п-ова Камчатка, 2023 г.

Fig. 4. Content of PHC (a) and CES (b) in the surface layer of bottom sediments in the coastal waters of Kamchatka Peninsula, 2023

Установлено, что нефтепродукты вносят наибольший вклад в загрязнение акватории Авачинской губы [10]. Согласно региональной классификации [27], значения ХЭВ в осадках на большинстве станций соответствуют уровню загрязнения I (условно чистые), на ст. 15, 30, 2 – уровню II (не наблюдается видимой деградации биоценозов), на ст. 1 и 3 – уровню III, при котором отмечается начало деградации биоценозов. При этом на ст. 1 доля НУ от ХЭВ составляет более 0,5.

Между содержанием ХЭВ и НУ выявлена сильная положительная корреляция ($r = 0,86$, $n = 17$), отражающая их общую природу – преимущественно углеводородное происхождение, связанное с урбанизацией, судоходной и портовой деятельностью. Средняя доля НУ в составе ХЭВ составила 0,29 (от 0,06 до 0,60). Минимальные концентрации НУ наблюдались на ст. 8 и 24, ХЭВ – на ст. 8, что соответствовало районам накопления песчаного материала.

Способность донных отложений к адсорбции НУ зависит в том числе от их гранулометрического состава и общего содержания в них органического ве-

щества: с увеличением содержания органического вещества и доли тонкодисперсной пелитовой фракции в составе осадков возрастает их способность к накоплению НУ [28–31]. Концентрации ХЭВ положительно коррелировали с $C_{орг}$ ($r = 0,75$, $n = 17$) и ППП ($r = 0,90$, $n = 15$), что указывает на ведущую роль органической матрицы в накоплении неполярных органических соединений.

Для оценки степени загрязнения донных отложений НУ в мировой практике используются два основных подхода: сравнение с региональными нормативными критериями и с фоновыми (природными) концентрациями. Пороговые значения, превышение которых указывает на загрязнение, существенно изменяются в зависимости от региона и составляют $> 1,5$ мг/100 г для Персидского залива [32], > 5 мг/100 г для вод Южной Африки ³, > 50 мг/100 г для Канады ⁴. Фоновые концентрации НУ для морских илов, по данным ⁵, обычно находятся в диапазоне 1–20 мг/100 г сухой массы, что согласуется со значением 20 мг/100 г, приведенным для Мексиканского залива [33, 34].

Параметры и статистические характеристики итоговой регрессионной модели приведены в таблице. Наиболее устойчивым и значимым предиктором содержания НУ оказалось содержание органического вещества по ППП. Для оценки количественного вклада таких факторов, как содержание органического вещества и степень урбанизации побережья, была использована регрессионная модель

$$\ln(\text{НУ}) = -0,77 + 0,47 \cdot \text{Urban} + 0,37 \cdot \text{ППП}.$$

Статистические характеристики линейной регрессионной модели Statistical characteristics of the linear regression model

Параметр / Parameter	Коэффициент β / Coefficient β	Стандартная ошибка / Standard error	t -статистика / t -statistics	p -значение / p -value
Свободный член / Absent term	–0,766	0,427	–1,793	0,098
<i>Urban</i>	0,472	0,277	1,702	0,114
ППП / LOI	0,371	0,079	4,671	0,001

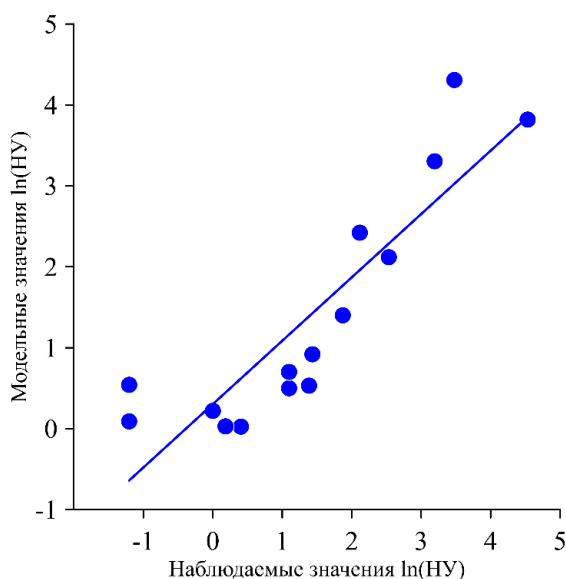
Предложенная регрессионная модель объясняет около 80 % вариации $\ln(\text{НУ})$ ($R^2 = 0,80$, $Adj R^2 = 0,76$, $AIC = 39,42$, F -статистика = 21,65), при этом коэффициент при ППП статистически значим ($\beta \approx 0,37$, $n = 15$, $p \approx 0,001$), несмотря на ограниченное число наблюдений (рис. 5). Это означает, что увеличение доли органического вещества в ДО на 1 % сопровождается ростом кон-

³ Environmental Guidelines and Standards for the Petroleum Industry in Nigeria (EGASPIN). Lagos, Nigeria : DPR, 2002. 129 p

⁴ Atlantic RBCA (Risk-Based Corrective Action) for Petroleum Impacted Sites in Atlantic Canada. Version 3. User Guidance. Canada : Atlantic RBCA, 2012. 102 p.

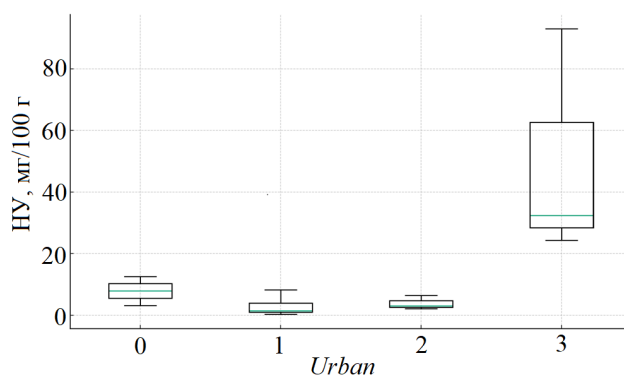
⁵ Кравченко Е. В., Бибичков А. Г. Нефтепродукты в современных морских отложениях как экологический индикатор при дампинге. Москва : Государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт морского транспорта, 1988. 54 с. Деп. в В/О «Мортехинформреклама» 17.10.1988 № 917 мф 88.

центраций нефтяных углеводородов в среднем примерно в 1,45 раза (при увеличении ППП на 1 % при прочих равных условиях (одинаковая урбанизация) значение $\ln(\text{НУ})$ увеличивается на 0,37).



Р и с. 5. Соотношение наблюдаемых и модельных значений $\ln(\text{НУ})$ в донных отложениях
Fig. 5. Relationship between the observed and model-derived values of $\ln(\text{PHC})$ in bottom sediments

При включении в модель показателя $C_{\text{орг}}$ вместо ППП направление связи сохранялось, однако его вклад в объяснение вариации $\ln(\text{НУ})$ был менее выраженным. На практике ППП является более интегральным и чувствительным индикатором органической матрицы донных осадков. Фракция $< 0,05$ мм, хотя и демонстрирует положительную корреляцию с содержанием НУ, не была включена в итоговую регрессионную модель в связи с сильной мультиколлинеарностью с ППП ($r \approx 0,9$), что делает статистически невозможным надежное разделение их эффектов при ограниченном объеме выборки.



Р и с. 6. Распределение нефтяных углеводородов вдоль градиента антропогенной нагрузки (*Urban*)
Fig. 6. Distribution of petroleum hydrocarbons along the anthropogenic pressure (*Urban*) gradient

Результаты регрессионного анализа демонстрируют наличие выраженной тенденции к увеличению концентраций нефтяных углеводородов при приближении к урбанизированным участкам побережья. Коэффициент при *Urban* положителен ($\beta \approx 0,47$) и указывает на тенденцию увеличения уровней НУ при росте степени урбанизации (примерно в 1,5–1,7 раза при переходе от одной категории к другой) (рис. 6), однако при имеющемся числе наблюдений ($n = 15$) его значимость находится на уровне $p \approx 0,1$.

Полученный результат подчеркивает, что даже при одинаковом уровне антропогенной нагрузки станции с более высоким содержанием органики аккумулируют существенно больше НУ. Таким образом, урбанизация определяет базовый уровень техногенной нефтяной нагрузки, а содержание органического вещества контролирует степень аккумуляции НУ в донных отложениях. Взаимодействие этих двух факторов формирует устойчивые пространственные паттерны загрязнения.

Заключение

По результатам проведенного исследования были выявлены закономерности распределения органического вещества и нефтяных углеводородов в донных отложениях прибрежных акваторий южной части п-ова Камчатка. Важным фактором, контролирующим их пространственную дифференциацию, является гранулометрический состав осадков. Максимальные концентрации органического вещества и нефтяных углеводородов зафиксированы в илистых отложениях изолированных акваторий (Авачинская губа, б. Русская).

По результатам регрессионного анализа ключевыми факторами формирования пространственного распределения нефтяных углеводородов в донных отложениях являются уровень антропогенной нагрузки и содержание органического вещества. Итоговая модель объясняет около 80 % вариации $\ln(\text{НУ})$ ($R^2 = 0,80$, $\text{Adj } R^2 = 0,76$, $\text{AIC} = 39,42$, F -статистика = 21,65), а увеличение ППП на 1 % при прочих равных условиях соответствует росту содержания НУ примерно в 1,45 раза. Коэффициент при показателе антропогенной нагрузки указывает на тенденцию увеличения содержания НУ примерно в 1,6 раза при приближении к зонам прибрежной инфраструктуры.

Таким образом, пространственное распределение исследуемых параметров формируется под совместным влиянием литодинамических условий, определяющих накопление тонкодисперсного органически обогащенного материала и антропогенной нагрузки, способствующей поступлению загрязнителей. Наиболее уязвимыми к аккумуляции нефтяных углеводородов являются замкнутые акватории с высоким содержанием илистого материала, что необходимо учитывать при оценке рисков в урбанизированных прибрежных зонах региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oceanographic and human impacts on the compositions of sedimentary organic matter along the southern coast of Zhoushan / S. Parker [et al.] // Journal of Marine Systems. 2022. Vol. 227. 103681. EDN TJCSFJ. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103681>

2. *Maqsood A., Lobos-Moysa E.* Bottom Sediments as Dynamic Arenas for Anthropogenic Pollutants: Profiling Sources, Unraveling Fate Mechanisms, and Assessing Ecological Consequences // *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. Vol. 26, iss. 20. 10219. EDN LLPZNN. <https://doi.org/10.3390/ijms262010219>
3. Sediments: sink, archive, and source of contaminants / A. C. Chiaia-Hernández [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29, iss. 57. P. 85761–85765. EDN HVWXWS. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24041-1>
4. Heavy Metal Pollution in Coastal Environments: Ecological Implications and Management Strategies: A Review / M. El-Sharkawy [et al.] // *Sustainability*. 2025. Vol. 17, iss. 2. 701. EDN HEVQHA. <https://doi.org/10.3390/su17020701>
5. *Кутаев А. Л.* Очистка поверхностного стока с территорий городов // *Водоснабжение и санитарная техника*. 1997. № 2. С. 20–21.
6. *Куручкина В. А., Богомолова Т. Г., Киров Б. Л.* Антропогенная нагрузка на реки урбанизированных территорий // *Вестник МГСУ*. 2016, № 8. С. 100–109.
7. *Федорова Е. В., Карпунина О. П., Максимчук Н. С.* Учет загрязнения водных объектов стоком с городов в схемах комплексного использования и охраны водных объектов // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2011. № 2. С. 21–29.
8. Органические вещества донных отложений в условиях урбанизации побережья (на примере бухты Казачьей, Черное море) / О. В. Соловьёва [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 2. С. 234–242. EDN JPMEAV. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574592234-242>
9. Корреляционные зависимости содержания загрязняющих веществ в донных отложениях на примере Авачинской губы / Е. В. Касперович [и др.] // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2016. № 36. С. 63–73.
10. Загрязнение нефтепродуктами прибрежных акваторий Авачинской губы (Авачинский залив) / Д. О. Мартыненко [и др.] // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2025. № 71. С. 87–107. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2025-71-87-107>
11. The influence of the quantity and quality of sediment organic matter on the potential mobility and toxicity of trace elements in bottom sediment / A. Baran [et al.] // *Environmental Geochemistry and Health*. 2019. Vol. 41, iss. 6. P. 2893–2910. EDN HERLVH. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00359-7>
12. *Liu Z., Lee C.* The role of organic matter in the sorption capacity of marine sediments // *Marine Chemistry*. 2007. Vol. 105, iss. 3–4. P. 240–257. EDN MDDASX. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.02.006>
13. *Nelson W. G.* A Quantitative Assessment of Organic Carbon Content as a Regional Sediment-Condition Indicator // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 114. 106318. EDN JZRVWV. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106318>
14. Grain size and organic carbon controls polyaromatic hydrocarbons (PAH), mercury (Hg) and toxicity of surface sediments in the River Conwy Estuary, Wales, UK / C. H. Vane [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 158. 111412. EDN XLBFON. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111412>
15. *Овсяный Е. И., Гуров К. И.* Исследование органического углерода и карбонатности в донных осадках шельфа южного побережья Крыма // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 62–72. EDN VTPDAB. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-62-72>
16. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н. А. Орехова [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. № 6. С. 523–533. EDN VNVPHL. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-6-523-533>
17. *Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Гуров К. И.* Распределение и состав углеводов в донных отложениях Камышовой бухты (Черное море) // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. Т. 40, № 5. С. 669–689. EDN YGDVYH.
18. *Ali S. A. M., Payus C., Ali M. M.* Surface Sediment Analysis on Petroleum Hydrocarbon and Total Organic Carbon from Coastal Area of Papar to Tuaran, Sabah // *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. 2015. Vol. 19, iss. 2. P. 318–324.

19. Численность и распределение отдельных групп бактерий в воде прибрежной акватории полуострова Камчатка / К. М. Зарипова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 135–148. EDN VUFBCX.
20. *Alfee S. L., Bloor M. C.* A global review of river sediment contamination and remobilization through climate change-induced flooding // *Sustainable Environment*. 2025. Vol. 11, iss. 1. 2440957. EDN NRRMTC. <https://doi.org/10.1080/27658511.2024.2440957>
21. *Забегаетов И. А., Шульгин В. Ф., Орехова Н. А.* Применение инструментальных методов анализа донных отложений для экологического мониторинга морских экосистем // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Т. 7 (73), № 4. С. 242–254.
22. *Marlow B. N., Griffen B. D.* Urbanization indices development and use in the coastal ecological realm: a review // *Frontiers Ecology Evolution*. 2025. Vol. 13. 1607614. EDN JPALLG. <https://doi.org/10.3389/fevo.2025.1607614>
23. Large conservation opportunities exist in >90% of tropic-subtropic coastal habitats adjacent to cities / T. Mazor [et al.] // *One Earth*. 2021. Vol. 4, iss. 7. P. 1004–1015. EDN RTPOKL. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.06.010>
24. *Akaike H.* A new look at the statistical model identification // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974. Vol. 19, iss. 6. P. 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
25. *Burdige D. J.* Preservation of Organic Matter in Marine Sediments: Controls, Mechanisms, and an Imbalance in Sediment Organic Carbon Budgets? // *Chemical Reviews*. 2007. Vol. 107, iss. 2. P. 467–485. <https://doi.org/10.1021/cr050347q>
26. *Kubo A., Kanda J.* Seasonal variations and sources of sedimentary organic carbon in Tokyo Bay // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 114, iss. 2. P. 637–643. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.030>
27. *Миронов О. Г., Миловидова Н. Ю., Кирюхина Л. Н.* О предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов в донных осадках прибрежной зоны Черного моря // Гидробиологический журнал. 1986. Т. 22, № 6. С. 76–78.
28. Загрязняющие вещества в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) / Е. А. Котельянец [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 469–480. EDN GLPOSX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-469-480>
29. *Валиев В. С., Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р.* Нефтяные углеводороды в донных отложениях: состав, идентификация, механизмы трансформации (обзор) // *Российский журнал прикладной экологии*. 2020. № 1 (21). С. 41–51. <https://doi.org/10.24411/2411-7374-2020-00001>
30. *Al-Jber R., Al-Sarawi M.* Assessment of Heavy Metals and Total Petroleum Hydrocarbons in Bottom Sediments of Kuwait Bay // *American Journal of Environmental Protection*. 2024. Vol. 13, iss. 6. P. 234–245. EDN CEGYAG. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20241306.17>
31. Spatial distribution of total petroleum hydrocarbons in surface sediments of Palk Bay, Tamil Nadu, India / P. Raja [et al.] // *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. 2022. Vol. 4, iss. 3. P. 20–28. EDN XKTGRW. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.10.002>
32. Bottom sediments of the Arabian Gulf–II. TPH and TOC contents as indicators of oil pollution and implications for the effect and fate of the Kuwait oil slick / M. S. Massoud [et al.] // *Environmental Pollution*. 1996. Vol. 93, iss. 3. P. 271–284. EDN ANADEJ. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(96\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00042-5)
33. *Gearing J. N., Buckley D. E., Smith J. N.* Hydrocarbon and Metal Contents in a Sediment Core from Halifax Harbour: A Chronology of Contamination // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1991. Vol. 48, iss. 12. P. 2344–2354. <https://doi.org/10.1139/f91-275>
34. High molecular weight hydrocarbons in Gulf of Mexico continental slope sediments / M. C. Kennicutt [et al.] // *Deep Sea Research*. 1987. Vol. 34. P. 403–424. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(87\)90145-2](https://doi.org/10.1016/0198-0149(87)90145-2)

Об авторах:

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

Гуров Константин Игоревич, научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5962-7697, ORCID ID: 0000-0003-3460-9650, ResearcherID: L-7895-2017, gurovki@gmail.com**

Тихонова Елена Андреевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 3786-7334, ORCID ID: 0000-0002-9137-087X, Scopus Author ID: 57208495804, ResearcherID: X-8524-2019, tihonova@mail.ru**

Соловьёва Ольга Викторовна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 3114-7955, ORCID ID: 0000-0002-1283-4593, Scopus Author ID: 57416802600, ResearcherID: X-4793-2019, kozl_ya_oly@mail.ru**