

Научная статья

УДК 550.42  
EDN: TPLFYQ

## Геохимические характеристики и особенности пространственного распределения тяжелых металлов и микроэлементов в донных отложениях Азовского моря

К. И. Гуров<sup>1</sup>, Е. А. Котельянец<sup>1</sup>, Ю. С. Гурова<sup>1</sup>, ✉, О. В. Степаньян<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>2</sup> Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

✉ [gurova@mhi-ras.ru](mailto:gurova@mhi-ras.ru)

Поступила в редакцию 22.09.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025;  
принята к публикации 16.03.2026.

### Аннотация

**Цель.** Оценка геохимических характеристик (гранулометрический состав, содержание органического и неорганического/карбонатного углерода) и их влияния на особенности пространственного распределения тяжелых металлов в поверхностном слое донных отложений в южной и центральной частях Азовского моря – цель настоящей работы.

**Методы и результаты.** В работе использованы данные, полученные в ходе экспедиционных работ на НИС «Профессор Водяницкий» в 2019–2020 гг. Отбор проб поверхностного слоя отложений (0–5 см) осуществлялся дночерпателем Петерсона (площадь захвата 0,1 м<sup>2</sup>). На основе анализа данных о гранулометрическом составе донных отложений в поверхностном слое Азовского моря были оценены закономерности пространственного распределения фракций: гравийной (10–1 мм), песчаной (1–0,1 мм), алеврито-пелитовой (0,1–0,05 мм) и пелито-алевритовой (< 0,05 мм). Наличие и степень антропогенного загрязнения отложений тяжелыми металлами оценивались путем расчета различных индексов загрязнения ( $CF$ ,  $I_{geo}$ ,  $PLI$ ,  $C_{deg}$ ), в том числе величины средней характерной концентрации, нивелирующей влияние типа осадков. Полученные результаты показали, что донные отложения Азовского моря образованы преимущественно пелито-алевритовыми илами (в среднем 77 %) с фрагментарными включениями песчаного материала (в среднем 5 %) и на отдельных станциях – преобладающей долей ракушечного детрита (в среднем 18 %). Содержание органического углерода изменялось от 0,6–1,9 % в гравийно-песчаных отложениях до 2,6–3,1 % в отложениях алеврито-пелитовых илов со средним значением 2,0 % ( $n = 15$ ). Преобладающими среди определяемых микрокомпонентов поровых вод были восстановленные формы железа и марганца. Отмечено, что в среднем для всех определяемых микроэлементов (за исключением Sr и Mn) получены отрицательная корреляция с гравийной и песчаной фракциями, а также содержанием карбонатного углерода и положительная корреляция с долей илистого материала, вкладом пелитовой фракции и содержанием органического углерода.

**Выводы.** С использованием современных натуральных данных о геохимических характеристиках донных отложений подтверждено, что основными факторами процесса осадконакопления в Азовском море являются абразия берегов, биогенная седиментация и особенности рельефа дна. Полученные оценки содержания микроэлементов в донных отложениях характеризуют их как преимущественно незагрязненные и умеренно загрязненные. Превышение кратности средней характерной концентрации и средний уровень загрязнения (по индексу  $I_{geo}$ ) наблюдался для Cr, Cu и Zn.

© Гуров К. И., Котельянец Е. А., Гурова Ю. С., Степаньян О. В., 2026

**Ключевые слова:** Азовское море, донные отложения, гранулометрический состав, органический углерод, тяжелые металлы, индексы загрязнения, средняя характерная концентрация, индекс геоаккумуляции

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 24 апреля 2024 г. № 075-15-2024-528 на реализацию КНП по приоритетным направлениям научно-технологического развития). Авторы выражают благодарность И. А. Забегасеву за помощь в определении содержания органического и карбонатного углерода. Данные для анализа химического состава поровых вод взяты из банка океанографических данных МГИ.

**Для цитирования:** Геохимические характеристики и особенности пространственного распределения тяжелых металлов и микроэлементов в донных отложениях Азовского моря / К. И. Гуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 3. С. 382–401. EDN TPLFYQ.

Original article

## Geochemical Characteristics and Features of Spatial Distribution of Heavy Metals and Microelements in the Sea of Azov Bottom Sediments

К. И. Гуров<sup>1</sup>, Е. А. Котелянц<sup>1</sup>, Ю. С. Гурова<sup>1</sup>, ✉, О. В. Степанян<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences,

Rostov-on-Don, Russia

✉ gurova@mhi-ras.ru

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the study is to assess the geochemical characteristics (granulometric composition, content of organic and inorganic/carbonate carbon) and their impact on the features of spatial distribution of heavy metals in the surface layer of bottom sediments in the southern and central Sea of Azov.

**Methods and Results.** The data obtained during the expeditions at the R/V “Professor Vodyanitsky” in 2019–2020 were used. The sediments surface layer (0–5 cm) was sampled by the Peterson grab sampler (capture area is 0.1 m<sup>2</sup>). The analysis of a modern data set on the sediments granulometric composition of the bottom surface layer in the Azov Sea made it possible to assess the patterns in spatial distribution of the following fractions: gravel (10–1 mm), sand (1–0.1 mm), aleurite-pelitic (0.1–0.05 mm), and pelite-aleuritic (< 0.05 mm) ones. The presence and degree of anthropogenic pollution of sediments with heavy metals were assessed by calculating various pollution indices ( $CF$ ,  $I_{geo}$ ,  $PLI$ , and  $C_{deg}$ ), including the values of average characteristic concentration which leveled out the impact of the sediments type. The obtained results showed that the Azov Sea bottom sediments were formed predominantly by pelite-aleuritic silts (on average 77 %) with fragmentary inclusions of sandy material (on average 5 %), and at some stations, a predominant portion of shell detritus (on average 18 %) was noted. The organic carbon content varied from 0.6–1.9 % in the gravel-sand sediments to 2.6–3.1 % in the aleurite-pelitic silt sediments with an average value 2.0 % ( $n = 15$ ). Among the trace elements determined in pore waters, the reduced forms of iron and manganese were predominant. It was noted that, on average, all the determined trace elements (except for Sr and Mn) had shown, on the one hand, a negative correlation with the gravel and sand fractions, and with the carbonate carbon content, and, on the other hand, a positive correlation with the portion of clay material, the pelitic fraction contribution, and the organic carbon content.

**Conclusions.** Application of modern *in situ* data on the geochemical characteristics of bottom sediments made it possible to confirm that the main factors in the sedimentation process in the Sea of Azov are the coastal abrasion, the biogenic sedimentation and the bottom topography features. The resulting assessments of content of trace elements in the bottom sediments characterize them as predominantly

unpolluted and moderately polluted. Exceeding of the multiplicity of average characteristic concentration, as well as moderate pollution level (by  $I_{geo}$  index) were observed for Cr, Cu, and Zn.

**Keywords:** Sea of Azov, bottom sediments, granulometric composition, organic carbon, heavy metals, pollution indices, average characteristic concentration, geoaccumulation index

**Acknowledgements:** The study was carried out with support of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-528 dated April 24, 2024 on the implementation of large-scale scientific project in the priority fields of science and technology development). The authors are thankful to I. A. Zabegaev for assistance in determining the organic and carbonate carbon content. Data for analyzing the chemical composition of pore waters were taken from the MHI Oceanographic Data Bank.

**For citation:** Gurov, K.I., Kotelyanets, E.A., Gurova, Yu.S. and Stepanyan, O.V., 2026. Geochemical Characteristics and Features of Spatial Distribution of Heavy Metals and Microelements in the Sea of Azov Bottom Sediments. *Physical Oceanography*, 33(3), pp. 420-438.

## Введение

Азовское море является уникальным мелководным водоемом с интенсивным хозяйственным использованием, обладает статусом рыбохозяйственного водоема высшей категории [1] и играет важную роль в формировании особенностей гидролого-гидрохимического режима Азово-Черноморского бассейна.

Поверхностный слой современных донных отложений Азовского моря формируется в условиях семиаридного климата в полузамкнутом водоеме и характеризуется значительным литологическим разнообразием, а основными источниками терригенного вещества являются речной сток Дона и Кубани, а также активная абразия берегов и дна [2].

Исследование уровня содержания тяжелых металлов (ТМ) является важной научной задачей, актуальность которой заключается в том, что в отличие от загрязняющих веществ органического происхождения, в той или иной степени подверженных разложению в водной среде, ТМ характеризуются высокой устойчивостью и способны сохраняться в окружающей среде в течение длительного времени, переходя из одной формы в другую.

Валовое содержание ТМ характеризует общую степень загрязнения донных отложений. Данный показатель является интегральным и отражает потенциальную опасность вторичного загрязнения водной толщи и экосистемы водоема в целом [3]. Поступая в природные водные объекты, ТМ аккумулируются в живых организмах и могут достигать высоких концентраций, обладающих токсическим эффектом [4–7]. Источники поступления ТМ в морские бассейны имеют природное и антропогенное происхождение. К природным источникам относятся речной сток (включающий растворенные и взвешенные формы) [8–10], выветривание пород и почв водосбора [11], атмосферные выпадения [12], абразия берегов и дна [13], поступление из поровых вод донных отложений [14] и водообмен с другими акваториями [15]. Учитывая мелководность бассейна Азовского моря, отметим, что особый интерес представляет исследование процессов миграции ТМ в результате взмучивания донных отложений во время сгонно-нагонных явлений, а также ветро-волнового перемешивания [16]. На фоне общих природных условий антропогенные аномалии выделяются точно, и связаны они преимущественно с портовой деятельностью [9, 17], неочищенными стоками ливневых и канализационных вод [18,

19], поступлением с горнодобывающих и металлургических [20], а также сельскохозяйственных предприятий [21, 22].

Особенности распределения и накопления ТМ в донных отложениях зависят от текстуры отложений, их минералогического состава, окислительно-восстановительных условий, процессов десорбции и физического переноса. Ключевым фактором, контролирующим процессы накопления и удержания загрязняющих веществ, в том числе ТМ, выступает гранулометрический состав <sup>1</sup>. Именно с гранулометрическим составом функционально связано механическое удержание отложениями взвешенных и некоторых коллоидных частиц [23]. Результаты ранних исследований этих характеристик для прибрежных районов Азовского моря отражены в работах <sup>2</sup> [8]. В настоящее время геохимические характеристики донных отложений исследуются главным образом для понимания процессов накопления и пространственного распределения загрязняющих веществ [24–27].

Результаты исследований донных отложений Азовского моря, полученные в последнее десятилетие, указывают, что пространственное распределение загрязнителей имеет выраженную зональность, связанную как с природными факторами, так и с особенностями хозяйственной деятельности в прибрежных регионах [5, 24, 28–32]. Вместе с тем, как отмечается в работе [28], донные отложения играют ключевую роль в аккумуляции загрязнений, выступая как индикатор антропогенного воздействия. Особое внимание уделяется Таганрогскому заливу, где, по данным работ [29–31], сформировались устойчивые зоны аккумуляции ТМ в донных отложениях. В монографии [24] представлены результаты исследования процессов миграции и трансформации ТМ в различных компонентах морских ландшафтов Азовского моря. Эти результаты служат основой для понимания источников поступления, а также механизмов распространения и трансформации ТМ в экосистеме моря.

В работе [25] приведены усредненные данные о содержании ТМ в донных отложениях за период 1986–2017 гг. Отмечено, что разброс среднегодовых показателей составил для большинства исследуемых металлов и мышьяка 1,2–1,7 раза, для кадмия и железа – 2,9 раза, для хрома – 4,2 раза. Установлено, что повышенные концентрации железа, марганца, хрома, мышьяка и никеля отмечались в 1991–1998 гг., а ванадия, стронция, цинка, хрома и свинца – в 2013–2016 гг.

Кроме того, экологическое состояние экосистемы Азовского моря рассматривается в ряде публикаций, где проводится исследование аккумуляции ТМ в гидробионтах и их влияния на рыбопродуктивность водоема [25]. Сравнительный анализ результатов, полученных в работе [31], с более поздними исследованиями позволяет говорить об определенной стабилизации уровня загрязнения, хотя проблема остается крайне актуальной. Современные работы, например [5], делают акцент на исследовании уровня загрязнения и оценке потоков ТМ в Таганрогском заливе, что открывает новые возможности для прогнозирования состояния экосистемы.

---

<sup>1</sup> Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И. Геохимия Черного моря. Киев : Наукова думка, 1982. 144 с.

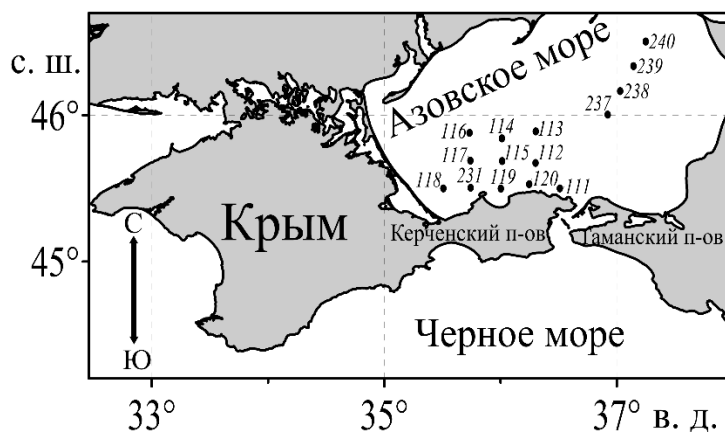
<sup>2</sup> Геология Азовского моря / Отв. ред. Е. Ф. Шнюков. Киев : Наукова думка, 1974. 247 с.

Таким образом, очевидно, что проблема загрязнения Азовского моря тяжелыми металлами продолжает оставаться актуальной и требует не только дальнейшего мониторинга, но и детального изучения процессов трансформации загрязняющих веществ, что особенно важно для выработки мер по сохранению устойчивости экосистемы и экологической безопасности региона. Однако в большинстве исследований основное внимание уделено восточной и северо-восточной частям моря, а донные отложения в юго-западной части, прилегающей к Крымскому п-ову, практически не изучены [26, 32]. Также крайне важно исследовать особенности накопления и распространения ТМ с учетом особенностей их фракционного состава и накопления органического вещества. Это позволит определить условия развития, дать прогноз изменения экологического состояния морской среды и предупредить экологически опасные явления.

Исходя из этого, целью настоящего исследования является оценка геохимических характеристик и их влияния на особенности пространственного распределения ТМ в поверхностном слое донных отложений на примере прибрежных районов в южной и центральной частях Азовского моря.

### Материал и методы

В работе использованы данные, полученные в ходе экспедиций на НИС «Профессор Водяницкий» в 2019–2020 гг. Исследуемая область представляла собой два участка: первый был расположен в южной части Азовского моря, примыкающей к Керченскому п-ову, а второй представлял собой разрез из четырех станций в центральной части моря (рис. 1).



**Рис. 1.** Расположение исследуемого Азово-Черноморского региона и схема станций отбора проб донных отложений в Азовском море

**Fig. 1.** Location of the Azov-Black Sea region under study and the layout of bottom sediment sampling stations in the Sea of Azov

Отбор проб поверхностного слоя осадков (0–5 см) проводился с помощью дночерпателя Петерсона (площадь захвата 0,1 м<sup>2</sup>). Для последующего анализа содержания ТМ из центральной части дночерпателя производился отбор верхнего 5-сантиметрового слоя осадка с использованием пластиковой ложки.

Пробы помещались в предварительно промаркированные полиэтиленовые пакеты с zip-замком. Затем в лабораторных условиях пробы высушивались до постоянной массы при температуре 105°C с последующей гомогенизацией.

Гранулометрический анализ проб донных отложений проводился методом декантации и рассеивания (ГОСТ 12536-2014). Для разделения и взвешивания крупных фракций (> 0,1–0,05 мм) применялся ситовый метод. Анализ выполнялся с использованием набора сит с отверстиями разного диаметра (10; 7; 5; 2,5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 мм).

Определение содержания органического ( $C_{орг}$ ) и карбонатного ( $C_{карб}$ ) углерода в пробах донных отложений проводили методом сухого сжигания на экспресс-анализаторе АН-7529М по методике, адаптированной для морских донных отложений [33]. Величина среднеквадратического отклонения (СКО) для проб с содержанием  $C_{орг} < 0,5\%$  составила 0,03 %, с содержанием  $C_{орг} > 1,5\%$  – 0,083 %. Для  $C_{карб}$  величина СКО изменялась от 0,07 % для образцов с содержанием  $C_{карб} < 1\%$  до 0,09 % при содержании  $C_{карб} > 8\%$ .

Для анализа поровых вод донных отложений применялся полярографический метод анализа с использованием стеклянного Au-Hg-микроэлектрода [34, 35].

Для определения валового содержания ТМ (Fe, Mn, Ti, V, Cr, Ni, Cu, Zn, Sr, Pb, Co) в донных отложениях применялся метод рентгенфлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре «Спектроскан Макс-GVM» производства «Спектрон» (Россия)<sup>3</sup>. Калибровка оборудования выполнялась с использованием серии аттестованных эталонных образцов почв (чернозем типичный, дерново-подзолистая супесчаная почва, краснозем и карбонатный серозем). Валидация градуировочных графиков проводилась с применением государственных стандартных образцов ДСЗУ 163.1-98 и ДСЗУ 163.2-98. Для оценки воспроизводимости и точности измерений выполнялся восьмикратный анализ аттестованного образца ДСЗУ 16.3.1-98.

В условиях отсутствия региональных нормативов для оценки качества донных отложений был применен подход, нивелирующий влияние типа осадков. В его основе лежит средняя характерная концентрация (СХК) приоритетных загрязняющих веществ, установленная в работе [31] для различных типов грунта Азовского моря.

Отношение абсолютной концентрации к средней характерной концентрации представляет собой безразмерную величину, называемую кратностью СХК [31]:

$$\text{Кратность СХК} = \frac{C_i}{\text{СХК}},$$

где  $C$  – концентрация определяемого  $i$ -го элемента; СХК – средняя характерная концентрация  $i$ -го элемента для различных типов отложений.

В случае, если кратность СХК < 1, то в данный район моря, вне зависимости от абсолютных значений загрязненности и типа анализируемого грунта, практически не было свежего поступления определяемых тяжелых металлов.

---

<sup>3</sup> Методика выполнения измерения массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа М049-П/16. Санкт-Петербург : ООО «НПО Спектрон», 2016. 18 с.

При кратности СХК > 1 данный район является районом повышенного антропогенного воздействия в конкретный период времени.

Наличие и степень антропогенного загрязнения отложений ТМ оценивались путем расчета следующих параметров: коэффициента загрязнения (англ. *contamination factor, CF*) и индекса геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ). При расчете этих параметров, характеризующих уровень концентрации элемента относительно его фоновых значений, использовались средние значения концентраций элементов, полученные для донных отложений Азовского моря в период 1991–1995 гг. и представленные в работе [31]. Эти значения составили: 0,052 % для Mn, 3,33 % для Fe, 87 мг/кг для V, 38 мг/кг для Zn, 33 мг/кг для Cr, 29 мг/кг для Ni, 23 мг/кг для Cu, 17 мг/кг для Pb и 11 мг/кг для As.

**Средние характерные концентрации ТМ для различных типов донных отложений Азовского моря в период 1996–2006 гг. [31]**  
**Average typical concentrations of HM for various types of bottom sediments in the Sea of Azov for 1996–2006 [31]**

Тип грунта / Soil type	Fe, %	Mn, %	V, мг/кг / V, mg/kg	Zn, мг/кг / Zn, mg/kg	Cr, мг/кг / Cr, mg/kg	Cu, мг/кг / Cu, mg/kg	Ni, мг/кг / Ni, mg/kg	Pb, мг/кг / Pb, mg/kg	As, мг/кг / As, mg/kg
Ракуша с примесью песка / Shell with sand admixture	0,9	0,025	24	17	39	16	25	6	3
Ракуша с примесью песка и ила / Shell with sand and silt admixture	1,6	0,039	47	41	62	25	39	10	5
Илистый песок с примесью ракушки / Silty sand with shell admixture	2,7	0,055	69	79	76	29	51	13	7
Ил светло-серый / Light gray silt	3,7	0,060	84	98	80	35	60	17	8
Ил серый с ракушкой / Gray silt with shells	4,6	0,063	108	111	86	40	69	22	10
Темный плотный ил / Dark dense silt	5,2	0,065	125	120	92	46	75	25	12

Также были определены суммарные показатели загрязнения, которые широко применяются для экологической оценки донных отложений в прибрежной зоне: индекс загрязнения (англ. *pollution load index, PLI*) и степень загрязнения (англ. *degree of contamination, C<sub>deg</sub>*) [36–39].

Коэффициент загрязнения рассчитывался согласно работе [40]:

$$SF = \frac{\text{Эл}_{\text{проба}}}{\text{Эл}_{\text{фон}}},$$

где  $\text{Эл}_{\text{проба}}$  и  $\text{Эл}_{\text{фон}}$  – концентрация элемента непосредственно в исследуемых пробах (мг/кг) и фоновое значение элемента согласно [31]. Классы коэффициента загрязнения были разделены на низкий ( $CF \leq 1$ ), умеренный ( $CF = 1-3$ ), значительный ( $CF = 3-6$ ) и очень высокий ( $CF > 6$ ) [40].

Индекс геоаккумуляции рассчитывался согласно работе [41]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left( \frac{\text{Эл}_{\text{проба}}}{1,5 \cdot \text{Эл}_{\text{фон}}} \right).$$

Применение коэффициента 1,5 обусловлено необходимостью учесть возможные колебания фоновых значений элемента и пренебрежимо малый вклад антропогенных источников [42]. Градация величины индекса геоаккумуляции следующая:  $I_{\text{geo}} \leq 0$  – практически незагрязненные осадки; 0–1 – незагрязненные-умеренно загрязненные; 1–2 – умеренно загрязненные; 2–3 – средне загрязненные; 3–4 – сильно загрязненные; 4–5 – сильно-чрезмерно загрязненные;  $I_{\text{geo}} > 5$  – чрезмерно загрязненные [41].

Индекс загрязнения рассчитывался согласно работе [43]:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \cdot CF_2 \cdot CF_3 \cdot \dots \cdot CF_n},$$

где  $PLI$  – величина, характеризующая суммарный показатель загрязнения;  $CF_{1, 2, 3, \dots}$  – коэффициенты загрязнения для представленных выше металлов;  $n$  – количество металлов в выборке (в настоящей работе  $n = 10$ ); для загрязненных отложений  $PLI > 1$ , для незагрязненных  $PLI \leq 1$ .

Степень загрязнения, согласно работе [40], имеет вид

$$C_{\text{deg}} = \sum_{i=1}^n CF.$$

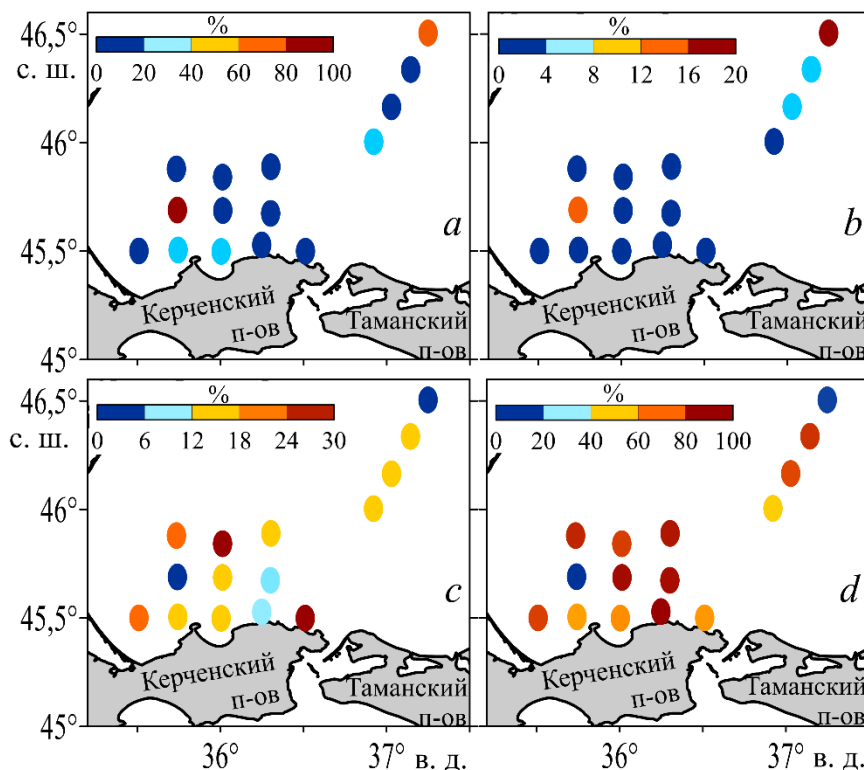
Низкому уровню степени загрязнения соответствует  $C_{\text{deg}} < 10$ , умеренному  $C_{\text{deg}} = 10-20$ , значительному  $C_{\text{deg}} = 20-40$ , очень высокому  $C_{\text{deg}} \geq 40$  [40].

## Результаты и обсуждение

### Геохимические характеристики донных отложений.

Гранулометрический состав. Описание донных отложений Азовского моря широко представлено в работах [44, 45]. Отмечено, что наибольшее распространение получили терригенные и органогенные донные отложения, незначительно представлены смешанные и хемогенные осадки [44–46]. Исходя из особенностей рельефа дна и глубины акватории моря, по своему гранулометрическому составу донные отложения изменяются от песков различной зернистости до алевроитовых и глинистых илов. Свой вклад вносят многочисленные неоднородности рельефа дна, такие как банки, косы и береговые валы. Здесь преимущественно накапливаются крупнозернистые гравийно-песчаные фракции и отмечается повышенная доля автохтонного ракушечного материала отложений [44–46].

На основе анализа современного массива данных гранулометрического состава донных отложений в поверхностном слое Азовского моря были определены закономерности пространственного распределения фракций: гравийной (10–1 мм; рис. 2, *a*), песчаной (1–0,1 мм; рис. 2, *b*), алеврито-пелитовой (0,1–0,05 мм; рис. 2, *c*), пелито-алевритовой (< 0,05 мм; рис. 2, *d*).



**Рис. 2.** Пространственное распределение фракций гранулометрического состава донных отложений: *a* – гравийной; *b* – песчаной; *c* – алеврито-пелитовой; *d* – пелито-алевритовой  
**Fig. 2.** Spatial distribution of the bottom sediments granulometric fractions: *a* – gravel; *b* – sand; *c* – aleurite-pelitic; *d* – pelite-aleuritic

Отмечено, что донные отложения Азовского моря в основном сложены пелито-алевритовыми илами. В среднем по всем пробам мелкодисперсный материал составляет 76 %, при этом на пелито-алевритовую фракцию приходится 62 %, на алеврито-пелитовую 14 %. Повышенная доля гравийно-песчаного материала (на 8 % выше средней) в центральной части акватории объясняется обильным включением ракушки средней и крупной размерности. Такое локальное повышение ракушечного материала может быть следствием биогенной седиментации.

Установлено также, что повышенная доля илистого материала (82–96 %), в том числе пелитовой фракции (55–88 %), отмечается на станциях в южной части Азовского моря, примыкающей к району Керченского пролива. Содержание песчаного материала изменяется в диапазоне 0,2–29 % (среднее составляет 5 %), максимальные величины отмечаются на ст. 117 вблизи Керченского

п-ова (17 %) и ст. 240 в центральной части моря (29 %), а минимальные (0,2–1,2 %) – в южной части вблизи Керченского пролива. В поверхностном слое отложений гравийный материал встречается фрагментарно и состоит из средних (5–7 мм) и крупных (> 10 мм) раковин и их обломков. Повышенная доля крупнозернистого материала (28–80 %) наблюдается на отдельных станциях в западной части исследуемого района вблизи Керченского п-ова, а также в центральной части моря (37–65 %) (рис. 2, а). Полученные результаты согласуются с более ранними данными и результатами картирования донных отложений Азовского моря, представленными в работе [46].

Отмеченные выше отличительные особенности распределения донных отложений в юго-восточной (примыкающей к Крымскому п-ову) и центральной частях моря определяются рельефом дна и особенностями седиментации материала, поступающего в донные отложения. Так, в центральной части моря на глубинах 10–13 м располагается обширная (площадью 5 тыс. км<sup>2</sup>) пологоволнистая аккумулятивная глинисто-илистая равнина (подводная равнина Панова), южная часть которой примыкает к Керченскому п-ову. Уклон поверхности дна незначителен и обращен в сторону Железинской ложбины [47]. Это согласуется с увеличением доли пелитового материала с запада на восток от 53 до 87 %. Также в формировании поверхностного слоя донных отложений велика роль биогенных процессов. Этим объясняется локальный максимум доли гравийно-песчаного материала (98 %) на ст. 117, расположенной на удалении от берега. Биогенные наносы формируют надводную часть аккумулятивных форм, а минеральные пески и алевриты участвуют в образовании их подводных склонов [48]. Кроме того, конфигурация и строение береговой линии подвержены штормовой, сезонной и многолетней изменчивости [49]. Сильные штормы способствуют кардинальной перестройке берегов и транспорту донных наносов, значительно расширяя границы береговой зоны. Это объясняет повышенные концентрации гравийно-песчаного материала на участке, примыкающем к м. Казантип в северной части Керченского п-ова.

Разрез, расположенный в центральной части моря, частично пересекает Железинскую ложбину (ст. 238, 239), а в своей северной части (ст. 240) – Ачужевскую банку. Как результат, отмечаются локальные максимумы илистого материала, соответствующие понижениям в рельефе, и гравийно-песчаного материала, что характерно для подводных аккумулятивных форм (валов и банок).

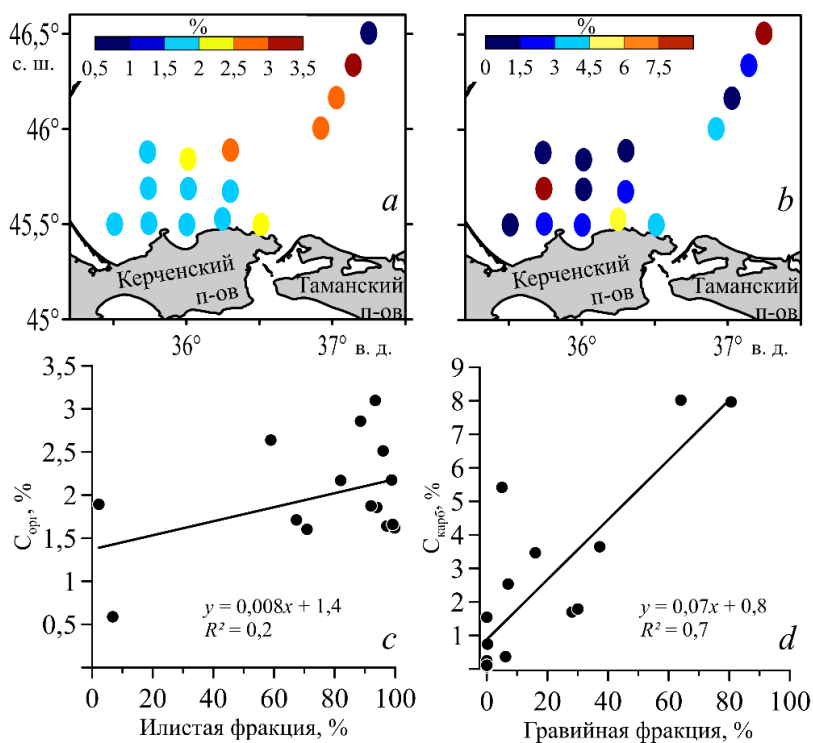
Представленные результаты согласуются с данными более ранних исследований, приведенных в работах <sup>2</sup> [46], а также дополняют их материалами, полученными в прибрежной части Крымского п-ова.

Содержание органического и неорганического углерода. Ранние исследования, посвященные особенностям распределения и содержания  $C_{орг}$  в верхнем слое донных отложений Азовского моря, представлены в работах [8, 50, 51]. Было отмечено, что абсолютные массы органического углерода в отложениях Азовского моря больше в 10 раз, чем в Балтийском, и в 33 раза, чем в Белом море, что объясняется особенностями минерализации органического вещества в водной толще более холодных водоемов и химической и бактериологической деструкции органики на границе вода – донные отложения в южных морях [8, 51]. По данным работы [51], максимальные значения (2,64–3,19 %) содержания  $C_{орг}$  характерны для глинистых илов, минимальные (0,26–0,29 %) – для песков

и крупных алевритов, концентрации меняются в зависимости от сезона, а также увеличиваются в направлении от устья р. Дон к центральной и южной частям моря. Также в этой работе с учетом более ранних данных установлены особенности многолетнего накопления  $C_{орг}$  в донных отложениях Азовского моря. Показано, что эти особенности носят циклический характер и определяются общей вариабельностью условий осадконакопления и межгодовыми изменениями гидрологических, гидробиологических и гидрохимических характеристик акватории.

Согласно результатам анализа современных проб донных отложений Азовского моря, содержание  $C_{орг}$  изменяется от 0,6–1,9 % в гравийно-песчаных отложениях до 2,6–3,1 % в алеврито-пелитовых илах вблизи Керченского пролива (рис. 3, *a*) и в пределах Железинской ложбины со средним значением 2,0 % ( $n = 15$ ) и соотносится с ранее полученными результатами [51].

При этом максимальные концентрации  $C_{орг}$  наблюдались как для проб с повышенной долей (> 80 %) пелитового материала, так и для отложений с включениями гравийно-песчаной фракции (11–30 %). Таким образом, корреляция между содержанием  $C_{орг}$  и иловой фракцией составила всего 0,3, что нарушает «классическое» представление о типе взаимосвязи между содержанием  $C_{орг}$  и гранулометрическими фракциями (рис. 3, *c*).



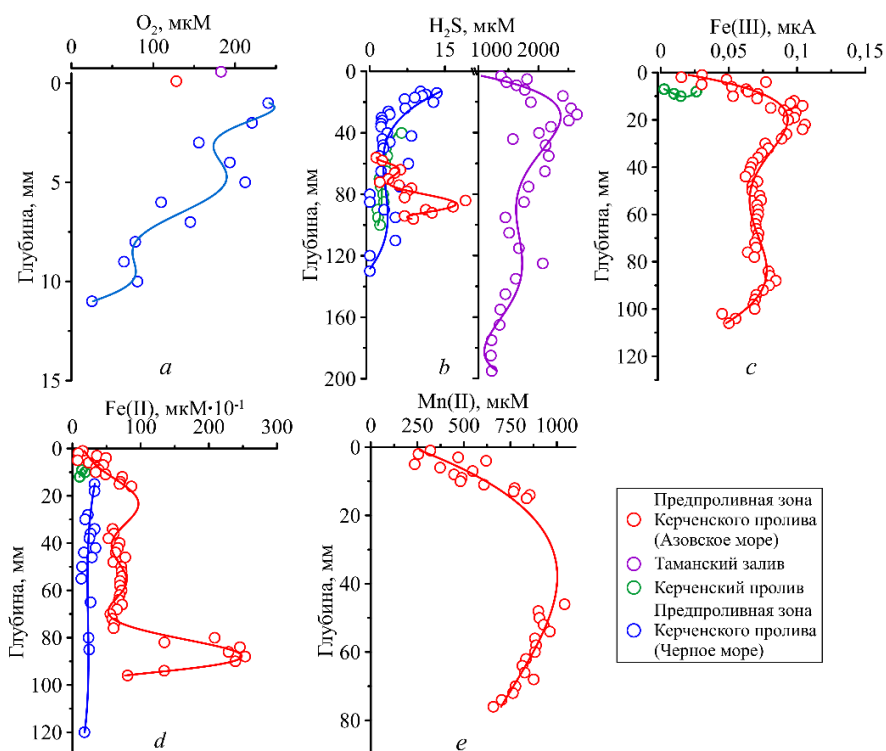
**Р и с. 3.** Пространственное распределение в донных отложениях Азовского моря  $C_{орг}$  (*a*) и  $C_{карб}$  (*b*), а также зависимости между содержанием  $C_{орг}$  и долей илистой фракции (*c*), содержанием  $C_{карб}$  и долей гравийной фракции (*d*)

**Fig. 3.** Spatial distribution of  $C_{орг}$  (*a*) and  $C_{карб}$  (*b*), as well as the relationships between the  $C_{орг}$  content and the proportions of silt fraction (*c*), and between the  $C_{карб}$  content and the proportions of gravel fraction (*d*) in the bottom sediments of the Sea of Azov

Содержание  $C_{\text{карб}}$  в поверхностном слое донных отложений Азовского моря изменяется от 0,1–0,4 % в отложениях с максимальной (> 96 %) долей илистого материала в западной части исследуемого участка до 4–8 % на станциях разреза через центральную часть Азовского моря (рис. 3, *b*). Повышенное содержание  $C_{\text{карб}}$  для илистых отложений на ст. 111 и 120, по-видимому, объясняется природой поступления терригенного материала в результате абразии берегов Керченского п-ова. Для  $C_{\text{карб}}$  максимальная положительная корреляция наблюдалась для гравийного (0,9) и песчаного (0,8) материала, а минимальная отрицательная – для илистого (–0,9), алевритового (–0,7) и пелитового (–0,8) (рис. 3, *d*).

Выявленная пространственная неоднородность геохимических характеристик донных отложений определяет особенности формирования в них окислительно-восстановительных условий и регулирует процессы поступления, накопления и перераспределения загрязняющих веществ.

Окислительно-восстановительные условия в донных отложениях. Анализ химического состава поровых вод донных отложений и особенностей окислительно-восстановительных условий в них был выполнен для станции, расположенной в южной части Азовского моря на выходе из Керченского пролива.



**Р и с. 4.** Вертикальное распределение основных компонентов поровых вод донных отложений для Азовского моря и прилегающих районов Таманского залива, Керченского пролива и предпроливной зоны со стороны Черного моря

**Fig. 4.** Vertical distribution of the main components of bottom sediment pore waters for the Sea of Azov and adjacent areas of the Taman Bay, the Kerch Strait and the pre-strait zone from the Black Sea side

Высокое содержание органического углерода (2,1 %) в мелкозернистых илах верхнего слоя донных отложений (99 % илистой фракции) обусловило интенсивное протекание окислительно-восстановительных процессов на границе раздела вода – дно, в результате чего сформировался резкий градиент концентрации кислорода и наблюдалось снижение его содержания на поверхности осадков до 133 мкМ. Преобладающими среди определяемых микрокомпонентов поровых вод выступали восстановленные формы железа и марганца (Fe(II) и Mn(II)). Высокие концентрации Fe(II) (в среднем 803 мкМ, максимум 2700 мкМ) подтверждают интенсивное протекание процессов его восстановления (рис. 4, *d*). Для Mn(II) характерно двухслойное распределение: в верхнем слое (1–15 мм) концентрация росла с 236 до 854 мкМ, а в нижележащем (36–76 мм) – падала с 1042 до 658 мкМ (рис. 4, *e*). В зоне отсутствия подвижных форм марганца и железа зафиксировано присутствие моносульфида железа (FeS), являющегося продуктом взаимодействия Fe(II) с сульфидами в условиях сульфатредукции. Изменения концентраций с глубиной определяются различными соотношениями фракций: доля гравийно-песчаного материала с глубиной растет от 1,5 до 56 %, доля ила сокращается от 99 до 44 %.

Количественные характеристики компонентов поровых вод на станции в Азовском море отличались от характеристик в районах, расположенных рядом (Керченский пролив, Таманский залив, Керченское предпроливье со стороны Черного моря).

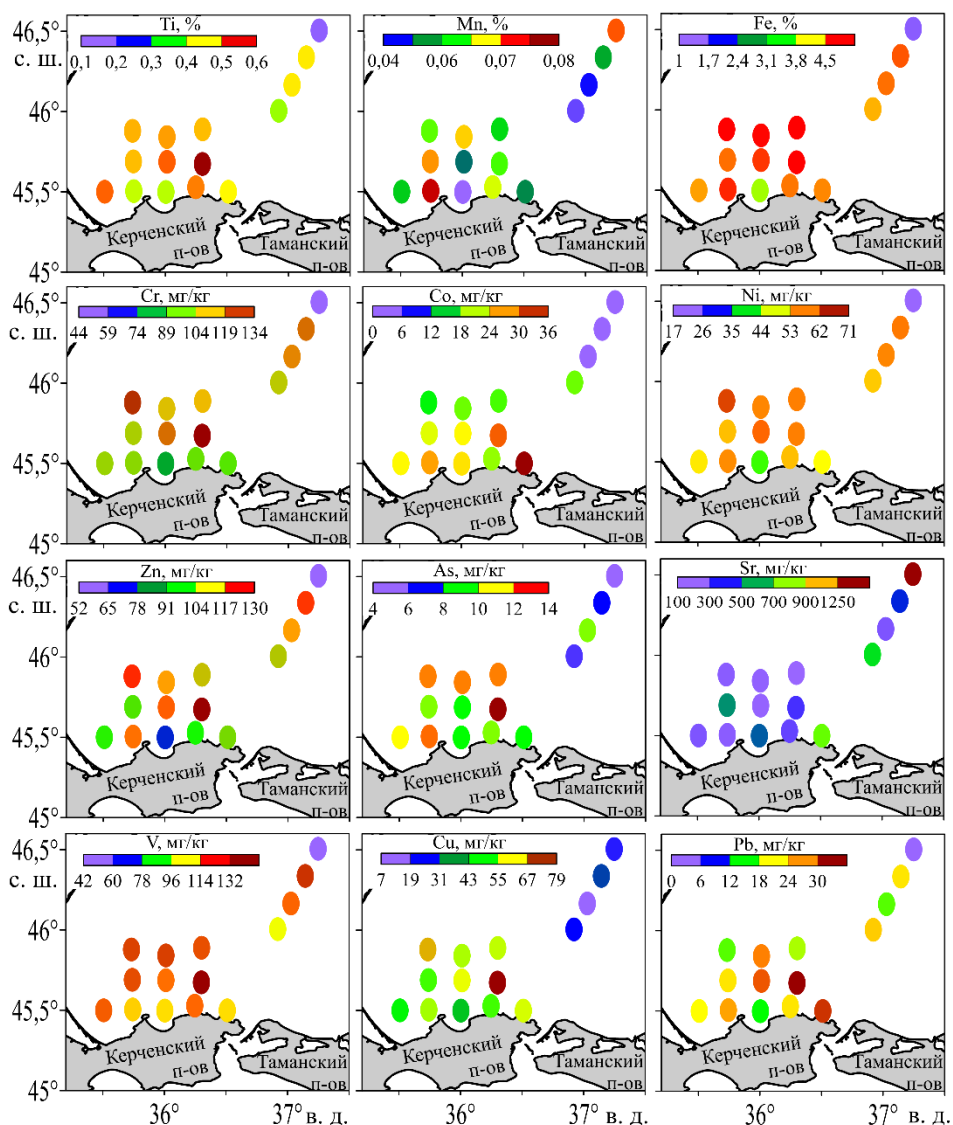
Так, в поровых водах донных отложений юго-западной части Керченского пролива доминировали восстановленные формы железа (до 2769 мкМ), содержание Fe(II) было сопоставимо с его концентрацией в наиболее антропогенно нагруженных акваториях Севастопольского региона [52].

Для донных отложений Таманского залива характерны анаэробные условия [53], что подтверждается полным отсутствием кислорода и присутствием сероводорода уже на поверхности. Его концентрация достигала максимума 2642 мкМ на глубине 28 мм (рис. 4, *b*), а среднее значение концентрации (1721 мкМ) примерно вдвое превышало максимальные значения, характерные для глубоководных осадков Черного моря [54].

Химический состав поровых вод в районе Керченского предпроливья со стороны Черного моря отличался глубоким (до 11 мм) проникновением кислорода в донные отложения (рис. 4, *a*), формированием устойчивых аэробных условий в поверхностном слое, а также отсутствием восстановленных форм марганца и относительно невысокими концентрациями Fe(II) (130–322 мкМ), существенно уступающими значениям на станции в Азовском море. Подобные характеристики обусловлены тем, что в поверхностном слое донных отложений преобладал крупнозернистый материал, а среднее содержание органического углерода составило 0,7 %, что вполне характерно для участков с активной гидродинамикой (придонные течения в данном районе достигают 20 см/с).

Тяжелые металлы в донных отложениях. Пространственное распределение изученных ТМ в поверхностном (0–5 см) слое отложений показано на рис. 5. Концентрации элементов изменялись в широких пределах: 0,04–0,07 % (Mn), 0,14–0,58 % (Ti), 1,1–4,9 % (Fe), 4–13 мг/кг (As), 0–30 мг/кг (Pb), 0–33 мг/кг (Co), 17–65 мг/кг (Ni), 7–76 мг/кг (Cu), 52–122 мг/кг (Zn), 44–130 мг/кг

(Cr), 42–133 мг/кг (V), 128–1253 мг/кг (Sr). Измеренные величины согласуются с современными данными, полученными для прилегающих районов (Керченский пролив [39], Черное море [55]).



**Р и с. 5.** Пространственное распределение тяжелых металлов и микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Азовского моря

**Fig. 5.** Spatial distribution of heavy metals and trace elements in the surface layer of bottom sediments of the Sea of Azov

Установлено, что повышенное содержание титана (0,58 %), железа (4,9 %), хрома (130 мг/кг) отмечается на станциях в южной части Азовского моря, примыкающей к району Керченского пролива. Распределение концентраций микроэлементов в донных отложениях исследуемой части Азовского моря неод-

нородно. Возможно, это обусловлено особенностями геоморфологии дна, гидродинамического режима и распределения геохимических характеристик донных отложений. Так, минимальные концентрации всех исследуемых элементов были отмечены для ст. 240, расположенной в пределах Ачуевской банки, в гранулометрическом составе на этой станции отмечалась повышенная доля гравийно-песчаного материала (93 %). Максимальное содержание мышьяка (13 мг/кг), свинца (30 мг/кг) и кобальта (33 мг/кг) было определено в южной части исследуемой акватории. Максимальное содержание марганца (0,07 %), ванадия (133 мг/кг), никеля (65 мг/кг) отмечается на станциях в южной части, примыкающей к району Керченского пролива, и в центральной части Азовского моря. Повышенные концентрации цинка (113–122 мг/кг) наблюдаются по всей исследуемой акватории Азовского моря и отмечаются преимущественно для отложений с повышенной (77–85 %) долей пелитовой фракции. Максимальное содержание стронция (1253 мг/кг) определено в центральной части исследуемой акватории.

Сравнение данных с результатами работы [32] показало, что с 2016 г. значения для всех исследуемых элементов существенно снизились. Дополнительно проведено сравнение полученных результатов с многолетними мониторинговыми исследованиями (осредненными за 1996 и 2006 гг.), опубликованными в работе [31]. Отмечено, что для свинца, железа, никеля и мышьяка изменение концентраций минимальное. Для меди концентрации выросли на 12 мг/кг, для цинка на 14 мг/кг, для хрома на 25 мг/кг, для ванадия на 29 мг/кг. Полученные максимальные концентрации Zn и Cu также согласуются с более ранними данными по исследованию содержания этих элементов в донных отложениях Азовского моря, представленными в работе [28].

Средние величины кратности СХК для всех элементов, кроме Mn (0,98) и Ni (0,88), превышают единицу, что указывает на увеличение содержания исследуемых элементов. Максимальные значения отмечаются на ст. 117, что объясняется повышенными концентрациями элементов в гравийно-песчаных отложениях. Для хрома (1,3) и меди (1,4) превышение кратности СХК отмечается на большинстве станций, за исключением ст. 237–239 для Cu и ст. 240 для Cr.

Значения коэффициента  $CF$  показали низкий уровень загрязнения поверхностных отложений As (0,8) и Sr (0,8) и умеренный уровень загрязнения для Mn, Pb, Fe (1,1), V (1,3), Ni (1,8), Cu (2,0), Zn (2,6) и Cr (3,0).

Согласно градации величины индекса  $I_{geo}$ , донные отложения Азовского моря практически не загрязнены Sr (-1,3), As (-1,0), Mn и Fe (-0,5), Pb (-0,4), V (-0,3). По уровню накопления Ni (0,2), Cu (0,2), Zn (0,8) и Cr (1,0) донные отложения можно считать незагрязненными-умеренно загрязненными. На отдельных станциях донные отложения можно считать средне загрязненными: на ст. 112 – Zn, Cr, Cu; на ст. 113–116, 237–239 – Cr; на ст. 240 – Cu.

Значения суммарных индексов загрязнения  $PLI$  и  $C_{deg}$  составили 1,39 и 15,48 соответственно, что характеризует отложения Азовского моря как умеренно загрязненные.

Исследована связь пространственного распределения микроэлементов с геохимическими характеристиками донных отложений, такими как гранулометрический состав,  $S_{орг}$ ,  $S_{карб}$ . Анализ полученных данных показал, как группы

микроэлементов по-разному коррелируют с индивидуальными геохимическими характеристиками, что и определяет особенности их распределения.

В среднем для всех микроэлементов (за исключением Sr и Mn) отмечается отрицательная корреляция с гравийной и песчаной фракциями, а также содержанием карбонатного углерода и положительная корреляция – с общей долей илистого материала, а также вкладом пелитовой фракции и содержанием органического углерода.

Установлено, что максимальные положительные корреляции для Ti (0,7), V (0,7), Cr (0,7), Fe (0,7), Ni (0,7), Zn (0,6) и As (0,5) отмечались с долей пелитовой фракции отложений. Для Pb максимальная положительная корреляция (0,5) наблюдалась с долей илистой фракции, для Mn (0,4) и Sr (0,8) – с долей песчаного материала. Для Co и Cu максимальные соотношения отмечались с содержанием песка и были отрицательными (–0,5).

### Заключение

На основе анализа современных данных за период 2019–2020 гг. изучены геохимические особенности донных отложений и химический состав поровых вод, а также получены количественные оценки пространственного распределения и уровня загрязнения тяжелыми металлами донных отложений Азовского моря.

Установлено, что по гранулометрическому составу донные отложения на участке аккумулятивной равнины Панова были представлены преимущественно пелито-алевритовыми илами, состоящими на 65 % из пелито-алевритового и на 15 % из алеврито-пелитового материала. Наличие локальных участков повышенной доли гравийно-песчаного материала в южной части объясняется особенностями биогенной седиментации, штормовым транспортом наносов на станциях, расположенных вблизи берега, а в центральной части – расположением станции в пределах Ачуевской банки.

Высокая интенсивность накопления органического вещества в донных отложениях Азовского моря определила повышенное содержания в них  $S_{\text{орг}}$ . Максимальные концентрации  $S_{\text{орг}}$  наблюдались как для проб с повышенной долей (> 80 %) пелитового материала, так и для отложений с включениями гравийно-песчаного материала (11–30 %). Содержание  $S_{\text{карб}}$  изменялось от 0,1–0,4 % для илистых отложений с минимальным включением гравийно-песчаного материала до 4–8 % для отложений с повышенной долей ракушечного гравия и детрита, а также на станциях, расположенных вблизи абразионных берегов Керченского п-ова.

Количественные характеристики компонентов поровых вод на станции в Азовском море отличались от характеристик в районах, расположенных рядом (Керченский пролив, Таманский залив, предпроливная зона со стороны Черного моря). Интенсивные окислительно-восстановительные процессы в мелкозернистых отложениях с повышенным (2,1 %) содержанием  $S_{\text{орг}}$  привели к формированию выраженного градиента концентрации кислорода и снижению его концентрации на поверхности отложений до 133 мкМ. Преобладающими среди определяемых микрокомпонентов поровых вод на станции в Азовском море были восстановленные формы железа и марганца.

Получены оценки степени загрязнения донных отложений как с учетом различия в их гранулометрическом составе (средняя характерная концентрация), так и с помощью геохимических индексов ( $CF$ ,  $I_{geo}$ ,  $PLI$ ,  $C_{deg}$ ). Отмечено, что для большинства исследуемых металлов наблюдался низкий и умеренный уровень загрязнения, не превышающий фоновые значения для Азовского моря. Превышение кратности средней характерной концентрации и средний уровень (по индексу  $I_{geo}$ ) загрязнения наблюдались для Cr (ст. 112–116, 237–239), Zn (ст. 112) и Cu (ст. 112, 240).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фракционирование и определение форм тяжелых металлов в донных отложениях Азовского моря / П. И. Курилов [и др.] // Журнал аналитической химии. 2009. Т. 64, № 7. С. 757–765. EDN KMLPSN.
2. Матишов Г. Г. Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2, № 1. С. 44–48. EDN KVVYSSX.
3. Формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях Азовского моря / П. И. Курилов [и др.] // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2007. № 9. С. 58–62. EDN IBKLBX.
4. Catsiki V.-A., Florou H. Study on the behavior of the heavy metals Cu, Cr, Ni, Zn, Fe, Mn and  $^{137}\text{Cs}$  in an estuarine ecosystem using *Mytilus galloprovincialis* as a bioindicator species: the case of Thermaikos gulf, Greece // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 86, iss. 1. P. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.07.005>
5. Матишов Г. Г., Буфетова М. В., Егоров В. Н. Нормирование потоков поступления тяжелых металлов в Азовское море по оценкам интенсивности седиментационного самоочищения вод // Наука Юга России. 2017. Т. 13, № 1. С. 44–58. EDN YHEZQD. <https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-13-1-44-58>
6. Effects of heavy metals on sex inversion of the mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam., 1819 in coastal zone of the Black Sea / N. S. Chelyadina [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2022. Vol. 185. Part A. 114323. EDN QVRSGR. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114323>
7. Березина Н. А., Петухов В. А. Оценка качества донных отложений Финского залива по составу мейобентоса в сочетании с биотестированием и химическим анализом // Океанология. 2023. Т. 63, № 3. С. 405–417. EDN SRMJFR. <https://doi.org/10.31857/S0030157423030024>
8. Хрусталеv Ю. П. Основные проблемы геохимии седиментогенеза в Азовском море. Апатиты : Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН, 1999. 247 с.
9. Буфетова М. В., Егоров В. Н. Загрязнение свинцом воды и донных отложений Таганрогского залива и открытой части Азовского моря в 1991–2020 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 105–119. EDN PFVZFY. <https://doi.org/10.29039/2413-5577-2023-2-105-119>
10. Assessment of Heavy Metal Contamination of Seawater and Sediments Along the Romanian Black Sea Coast: Spatial Distribution and Environmental Implications / E. Ristea [et al.] // Sustainability. 2025. Vol. 17, iss. 6. 2586. EDN AMSAVG. <https://doi.org/10.3390/su17062586>
11. Lithogenic and anthropogenic contributions of trace metal(*oid*s) in coastal sediments near the Port of Trieste (northern Adriatic Sea): A geochemical normalisation approach based on regional background values / S. Covelli [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2025. Vol. 214. 117774. EDN AZYDRI. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117774>
12. Chemical composition of Eastern Black Sea aerosol – Preliminary result / İ. Balcılar [et al.] // Science of The Total Environment. 2014. Vol. 488–489. P. 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.023>

13. *Санин А. Ю., Строчков А. А., Терзкий П. Н.* Оценка влияния природных процессов на содержание тяжелых металлов в воде Онежского озера // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65, № 1. С. 146-171. EDN QFIFON. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.108>
14. Early diagenetic processes in recent sediments of the Gulf of St-Lawrence: phosphorus, carbon and iron burial rates / P. Louchouart [et al.] // Marine Geology. 1997. Vol. 139, iss. 1–4. P. 181–200. EDN АНMQTZ. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(96\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00110-7)
15. *Петренко О. А., Жугайло С. С., Авдеева Т. М.* Результаты многолетних исследований уровня загрязнения морской среды Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2015. Т. 53. С. 4–18. EDN VKNQSL.
16. *Федоров Ю. А., Доценко И. В., Михайленко А. В.* Поведение тяжелых металлов в воде Азовского моря во время ветровой активности // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2015. № 3. С. 108–112. EDN UMDPBX.
17. *Гуров К. И., Котельянец Е. А.* Распределение Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Sr, Ti, Mn, Fe в донных отложениях Севастопольской бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 5. С. 512–529. EDN IOYNEZ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-5-512-529>
18. 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 GLPOXS. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-469-480>
19. Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China / Y. Wang [et al.] // CATENA. 2015. Vol. 125. P. 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.023>
20. *Гуров К. И., Котельянец Е. А., Гурова Ю. С.* Накопление тяжелых металлов и распределение областей техногенных нагрузок в Балаклавской бухте: результаты многолетних исследований // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 3. С. 310–330. EDN JARMVN.
21. Baseline values for heavy metals in agricultural soils in an European Mediterranean region / C. Micó [et al.] // Science of The Total Environment. 2007. Vol. 378, iss. 1–2. P. 13–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.010>
22. *Bonten L. T. C., Römkens P. F. A. M., Brus D. J.* Contribution of Heavy Metal Leaching from Agricultural Soils to Surface Water Loads // Environmental Forensics. 2008. Vol. 9, iss. 2–3. P. 252–257. <https://doi.org/10.1080/15275920802122981>
23. *Ledin M.* Accumulation of metals by microorganisms – processes and importance for soil systems // Earth-Science Reviews. 2000. Vol. 51, iss. 1–4. P. 1–31. EDN LMDZEJ. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00008-8)
24. *Михайленко А. В., Федоров Ю. А., Доценко И. В.* Тяжелые металлы в компонентах ландшафта Азовского моря. Таганрог : Издательство Южный федеральный университет, 2018. 214 с. EDN VSPZVE.
25. Тяжелые металлы в экосистеме Азовского моря / И. В. Кораблина [и др.] // Вопросы рыб-боловства. 2018. Т. 19, № 4. С. 509–521. EDN YNIXDN.
26. *Тихонова Е. А.* Органическое вещество донных отложений крымского и кавказского побережий (Азовское и Черное моря) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 52–67. EDN KLNVFH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-3-52-67>
27. *Буфетова М. В.* Влияние седиментационных процессов на динамику содержания соединений кадмия в воде и донных отложениях Азовского моря в 1991–2020 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 2. С. 122–136. EDN RRZLMA.

28. Буфетова М. В., Фень О. Н. Оценка загрязнения донных отложений Азовского моря тяжелыми металлами // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2016. № 3. С. 45–51. EDN WEAKHB.
29. Буфетова М. В. Оценка поступления и элиминации тяжелых металлов в Таганрогский залив Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 78–85. EDN ZYLSZD. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-78-85>
30. Буфетова М. В. Оценка способности взвесей Азовского моря концентрировать тяжелые металлы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 55–65. EDN YCNWRI. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-1-55-65>
31. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение / А. А. Кленкин [и др.]. Краснодар : ООО «Промсвещение-Юг», 2007. 324 с. EDN TWOKGD.
32. Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Соловьёва О. В. Оценка уровня загрязнения донных отложений крымского побережья Черного и Азовского морей // Принципы экологии. 2016. № 5. С. 56–70. EDN YKVGJJ.
33. Забегаев 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. Том 7, № 4. С. 242–254. EDN ZRWWTI.
34. Brendel P. J., Luther G. W. III. Development of a Gold Amalgam Voltammetric Microelectrode for the Determination of Dissolved Fe, Mn, O<sub>2</sub>, and S(-II) in Porewaters of Marine and Fresh Water Sediments // Environmental Science and Technology. 1995. Vol. 29, iss. 3. P. 751–761. <https://doi.org/10.1021/es00003a024>
35. Simultaneous measurement of O<sub>2</sub>, Mn, Fe, I-, and S (-II) in marine pore waters with a solid-state voltammetric microelectrode / G. W. Luther III [et al.] // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43, iss. 2. P. 325–333. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.2.0325>
36. Contamination and ecological risk assessment of heavy metals in water and sediment from hubs of fish resource river in a developing country / M. M. Ali [et al.] // Toxin Reviews. 2021. Vol. 41, iss. 4. P. 1253–1268. EDN WEEXZR. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.2001829>
37. Skorbilowicz M., Sidoruk M. Assessment of Heavy Metal Content and Identification of Their Sources in Bottom Sediments and Various Macrophyte Species of the Narew River (Poland) // Minerals. 2025. Vol. 15, iss. 1. 8. EDN ORAUJ. <https://doi.org/10.3390/min15010008>
38. Trace elements pollution in surface sediment of the Sea of Marmara coastal and transition water / L. Bat [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2025. Vol. 218. 118067. EDN OOHPI. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118067>
39. Radionuclides and heavy metals in the Kerch Strait sediments: Spatial distribution, fluxes and pollution loads / K. I. Gurov [et al.] // Continental Shelf Research. 2025. Vol. 285. 105386. EDN SXVBIY. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105386>
40. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // Water Research. 1980. Vol. 14, iss. 8. P. 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
41. Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971 // Umschau. 1979. Vol. 79. P. 778–783.
42. Salomons W., Förstner U. Metals in the Hydrocycle. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1984. 352 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0>
43. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index / D. L. Tomlinson [et al.] // Helgoländer Meeresuntersuchungen. 1980. Vol. 33, iss. 1. P. 566–575. EDN CBIAAU. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
44. Закономерности литохимии и палинологии современных донных отложений Азовского моря / Г. Г. Матишов [и др.] // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2, № 4. С. 38–51. EDN KVYTNI.

45. Литология и биостратиграфия голоценовых отложений Азовского моря: итоги 15-летних исследований / Г. Г. Матишов [и др.] // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 3. С. 24–34. EDN FVZSPU. <https://doi.org/10.7868/S25000640190303>
46. Матишов Г. Г. Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2007. Т. 3, № 3. С. 32–40. EDN KWMJON. <https://doi.org/10.23885/1813-4289-2007-3-3-32-40>
47. Матишов Г. Г. Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2, № 1. С. 44–48. EDN KVVYSSX.
48. Артюхин Ю. В. Перестройки береговой зоны Азовского моря как фактор некоторых исторических событий XVIII–XX вв. // Историко-географический сборник. Краснодар : ООО «Картика», 2007. Вып. 1. С. 313–328.
49. Матишов Г. Г., Артюхин Ю. В. Проблемы изучения берегов морей и задачи научного обеспечения их освоения (к 100-летию профессора В. П. Зенковича) // Вестник Южного научного центра РАН. 2010. Т. 6, № 2. С. 21–27. EDN NUIFOT.
50. Студеникина Е. И., Толоконникова Л. И., Воловик С. П. Микробиологические процессы в Азовском море в условиях антропогенного воздействия. Москва : Наука, 2002. 167 с.
51. Закономерности распределения  $S_{org}$  в донных отложениях российской части Азовского моря / Ю. А. Федоров [и др.] // Океанология. 2009. Т. 49, № 2. С. 229–236. EDN IYNWHI.
52. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Кислород и сульфиды в донных отложениях прибрежных районов Севастопольского региона Крыма // Океанология. 2018. Т. 58, № 5. С. 739–750. EDN XWVHWX. <https://doi.org/10.1134/S0030157418050106>
53. Формирование зон экологического риска в прибрежных акваториях Керченского пролива / К. И. Гуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 6. С. 637–654. EDN MEJENQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-6-637-654>
54. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Кислород и сероводород в верхнем слое донных отложений Черного моря // Система Черного моря. Москва : Научный мир, 2018. С. 543–559. EDN LOVBGU. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018.542>
55. Gurov K. I., Kurinnaya Y. S., Kotelyanets E. A. Features of Accumulation and Spatial Distribution of Microelements in Bottom Sediments of the Crimea Coastal Regions // Processes in GeoMedia – Volume III / Ed. T. Chaplina. Springer Geology. Cham : Springer, 2021. Vol. 3. P. 119–130. (Springer Geology Series ; vol. 3). EDN TURZBO. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3_12)

*Об авторах:*

**Гуров Константин Игоревич**, научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **Scopus Author ID: 57200248245**, **ResearcherID: L-7895-2017**, **SPIN-код: 5962-7697**, [gurovki@gmail.com](mailto:gurovki@gmail.com)

**Котельянец Екатерина Александровна**, научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0009-0007-1921-3566**, **Scopus Author ID: 36059344400**, **ResearcherID: AAA-8699-2019**, **SPIN-код: 4390-5829**, [plistus@mail.ru](mailto:plistus@mail.ru)

**Гурова Юлия Сергеевна**, научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, **Scopus Author ID: 57964475800**, **ResearcherID: AAB-5628-2019**, **SPIN-код: 9777-8929**, [gurova@mhi-ras.ru](mailto:gurova@mhi-ras.ru)

**Степаньян Олег Владимирович**, заведующий лабораторией прикладной океанографии, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4774-4835**, **SPIN-код: 6344-5427**, [step@ssc-ras.ru](mailto:step@ssc-ras.ru)