

Научная статья

УДК 504.4.054  
EDN: MNJPU

## Тяжелые металлы во взвешенном веществе в северной части Черного моря

Д. А. Кременчуцкий ✉, Е. А. Котельянец

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
✉ [d.kremenchutsky@gmail.com](mailto:d.kremenchutsky@gmail.com)

Поступила в редакцию 27.08.2025; одобрена после рецензирования 03.09.2025;  
принята к публикации 28.01.2026.

### *Аннотация*

*Цель.* Определить количественные характеристики пространственной изменчивости концентрации тяжелых металлов во взвешенном веществе и оценить взаимосвязь этой изменчивости с гидрологическими и гидрохимическими параметрами вод северной части Черного моря – цель настоящей работы.

*Методы и результаты.* Используются данные о величинах объемной и массовой концентрации тяжелых металлов (Pb, Zn, Ni, Fe, Cr, V, Co) во взвешенном веществе в водах Черного моря, полученные в ходе 133-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Отобрано и обработано 44 пробы воды с 33 станций. Данные о содержании металлов были получены методом рентгенофлуоресцентного анализа.

*Выводы.* Значения объемной и массовой концентрации анализируемых металлов во взвешенном веществе изменялись по пространству в пределах двух порядков. Повышенные значения объемной концентрации тяжелых металлов отмечались в северо-восточной части исследуемого района, пониженные были характерны для юго-западной части. Пространственная изменчивость массовой концентрации тяжелых металлов имела более сложный характер. Повышенные значения Pb, Zn, Ni отмечались в глубоководной части моря, пониженные – в прибрежной. Повышенные значения Fe и V были характерны для участка шельфа от м. Меганом до м. Чауда, пониженные – для глубоководной части. Повышенные и пониженные концентрации Cr и Co наблюдались как на шельфе, так и в глубоководной части исследуемой акватории. В глубоководной части моря массовая и объемная концентрация металлов с глубиной как увеличивалась, так и уменьшалась. В верхней части термоклина отмечался рост объемной (Pb, Ni, Fe, Cr, V, Co) и массовой (Fe, Cr, V, Co) концентрации большинства тяжелых металлов в 1,1–47,1 раза. Рост в 1,1–137 раз объемной (Zn, Fe, Cr, V, Co) и массовой (Zn, Fe, V, Co) концентрации большинства тяжелых металлов отмечен и на шельфе в придонном слое. С использованием метода главных компонент показано, что пространственная изменчивость объемной и массовой концентрации Fe, V, Co, Cr связана с влиянием литогенного фактора (абразия берега, проникновение азовоморских вод, атмосферный перенос), изменчивость Zn и Ni обусловлена влиянием биогенного фактора (продукция фитопланктона, адсорбция на органическом веществе), изменчивость Pb – влиянием гидродинамического фактора (изменчивость глубины перемешивания).

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, Черное море, взвешенное вещество, пространственная изменчивость

**Благодарности:** авторы выражают благодарность капитану и команде НИС «Профессор Водяницкий» за помощь в проведении работ на судне, а также членам отряда гидрологии и течений за данные о температуре и солёности. Пробы воды отобраны в Центре коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН». Работа выполнена в рамках тем государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0001 и FNNN-2024-0016.

© Кременчуцкий Д. А., Котельянец Е. А., 2026


Для цитирования: Кременчуцкий Д. А., Котельянец Е. А. Тяжелые металлы во взвешенном веществе в северной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 2. С. 275–293. EDN МНЛПУ.

Original article

## Heavy Metals in Suspended Matter in the Northern Black Sea

D. A. Kremenchutskii , E. A. Kotelyanets

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

 d.kremenchutsky@mhi-ras.ru

### Abstract

*Purpose.* The purpose of the study is to obtain quantitative characteristics of the spatial variability of heavy metal concentrations in suspended matter, as well as to assess the relationship between this variability and the hydrological and hydrochemical characteristics of the northern Black Sea waters.

*Methods and Results.* Data on the volume and mass concentrations of heavy metals (Pb, Zn, Ni, Fe, Cr, V, Co) in the Black Sea suspended matter obtained during the 133rd cruise of R/V “Professor Vodyanitsky” were used. The required information was derived through processing of 44 water samples taken at 33 stations. The data on metal content were obtained using the X-ray fluorescence analysis.

*Conclusions.* The volume and mass concentrations of the analyzed metals in suspended matter varied spatially within two orders of magnitude. The increased volume concentrations of heavy metals were observed in the northeastern part of the study area, whereas the decreased values were typical of its southwestern part. The spatial variability in mass concentrations of heavy metals was of more complex character. The increased values of Pb, Zn, and Ni were noted in the deep part of the sea, while the lower ones – in the coastal area. The raised values of Fe and V were typical of the shelf section from Cape Meganom to Cape Chauda, and the lower ones – of the deep-sea part. The increased and decreased concentrations of Cr and Co were observed both on the shelf and in the deep-sea part of the study area. In the deep part of the sea, the mass and volume concentrations of metals both grew and declined with depth. In the thermocline upper part, the volume (Pb, Ni, Fe, Cr, V, Co) and mass (Fe, Cr, V, Co) concentrations of most heavy metals rose by 1.1–47.1 times. On the shelf in the near-bottom layer, the volume (Zn, Fe, Cr, V, Co) and mass (Zn, Fe, V, Co) concentrations of most heavy metals also grew by 1.1–137 times. Having been applied, the method of principal components has shown that the spatial variability of volume and mass concentrations of Fe, V, Co, Cr is related to the impact of lithogenic factor (coastal abrasion, inflow of the Azov Sea waters and atmospheric transport), the variability of Zn and Ni is conditioned by the influence of biogenic factor (phytoplankton production, adsorption on organic matter), and the Pb variability – by the hydrodynamic factor (mixing depth variability).

**Keywords:** heavy metals, Black Sea, suspended matter, spatial variability

**Acknowledgments:** The authors are thankful to the captain and crew of R/V “Professor Vodyanitsky” for their assistance in the onboard work, as well as to the members of hydrology and currents group for providing temperature and salinity data. Water samples were taken at the Collective Use Center “R/V Professor Vodyanitsky” of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas. The study was carried out within the framework of the themes of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0001 and FNNN-2024-0016.

**For citation:** Kremenchutskii, D.A and Kotelyanets, E.A., 2026. Heavy Metals in Suspended Matter in the Northern Black Sea. *Physical Oceanography*, 33(2), pp. 319-338.

### Введение

Тяжелые металлы (ТМ) – группа химических элементов с относительно высокой атомной массой или плотностью (обычно свыше 5 г/см<sup>3</sup>), проявляющих склонность к биоаккумуляции в организмах [1–3]. К числу наиболее изучаемых ТМ в водных экосистемах относятся Pb, Zn, Ni, Fe, Cr, V, Co. Интерес

к Pb и Cr обусловлен тем, что эти металлы токсичны для живых организмов даже при низких концентрациях [4–6]. Влияние остальных металлов (Zn, Ni, Fe, V, Co) двойственно: при низких концентрациях они играют важную биологическую роль и жизненно необходимы для нормального функционирования и развития отдельных живых организмов, но с повышением концентрации они могут нарушать естественный ход физиологических и биохимических процессов и вызывать метаболические изменения у гидробионтов [6–11].

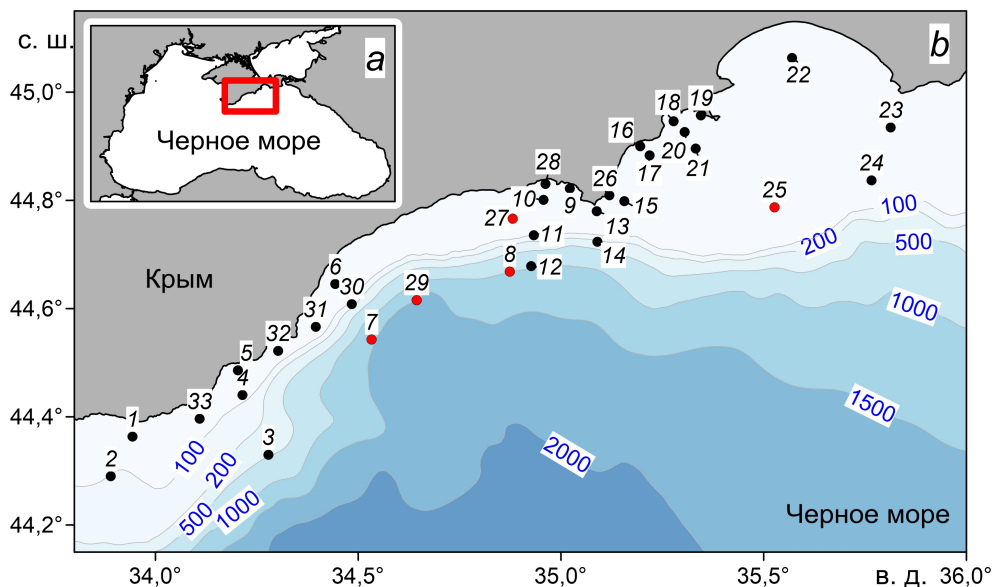
В морскую среду ТМ поступают в результате различных процессов: абразии берегов, сухой и влажной очистки атмосферы, речного стока и прямого сброса промышленных отходов [12–14]. Загрязнение морской среды нефтепродуктами – еще один важный источник ТМ [13, 15]. В морской среде ТМ распределяются между растворенной и взвешенной формами. Оседающее взвешенное вещество играет важную роль в вертикальном транспорте ТМ, седиментация адсорбированных ТМ на взвешенном веществе – основной механизм очистки от них водной толщи [16, 17]. Таким образом, данные о концентрации ТМ во взвешенном веществе необходимы для оценки скорости и времени их удаления из водной толщи. Это обуславливает актуальность представленного исследования.

Черное море, являясь полузамкнутым водоемом с ограниченным водообменом, представляет собой уникальную природную систему, особенно чувствительную к антропогенному воздействию [18]. Результаты недавних исследований указывают на рост концентрации ТМ в донных отложениях на шельфе Черного моря [19, 20], что может свидетельствовать также о росте их концентрации в воде. Отметим, что многие исследования сфокусированы на изучении концентрации ТМ в гидробионтах [10, 13, 21], донных отложениях [13, 22, 23] и в воде в растворенной форме [13, 14, 21, 24, 25] в Черном море. В то же время данные о концентрации ТМ во взвешенном веществе сильно ограничены [21, 26–29], а для района, представленного в настоящей работе, они отсутствуют в доступной литературе. Это обуславливает новизну нашего исследования.

Цель работы заключалась в получении количественных характеристик пространственной изменчивости концентрации тяжелых металлов во взвешенном веществе и оценке взаимосвязи этой изменчивости с гидрологическими и гидрохимическими характеристиками вод северной части Черного моря.

### Материалы и методы

**Отбор проб.** Натурные данные были получены в 133-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (11 сентября – 3 октября 2024 г.). Пробы морской воды отбирались в пластиковые емкости с помощью насоса *SP15P-B-6-95 (Finish Thompson Inc, США)*, исключающего загрязнение пробы тяжелыми металлами. В общей сложности было отобрано 44 пробы воды с 33 станций. Схема расположения станций показана на рис. 1. На каждой станции отбор проб морской воды проводился с горизонта 3 м. На ст. 7, 8, 25, 27, 29 дополнительно отбиралось 2–3 пробы с глубин до 66 м для получения данных о вертикальном распределении анализируемых параметров. Глубины, на которых отбирались пробы воды, выбирали непосредственно во время работы. Для этого использовали данные об изменении температуры воды с глубиной.



**Р и с. 1.** Район исследования (a) и расположение станций отбора проб морской воды в этом районе (b). Красными точками обозначено положение станций, на которых получены вертикальные профили

**F i g. 1.** Study area (a) and the location of seawater sampling stations there (b). Red dots indicate the station locations where vertical profiles were obtained

**Определение концентрации взвешенного вещества (*TSM*).** Методика определения *TSM* основана на РД 52.24.468-2019 «Массовая концентрация взвешенных веществ и сухого остатка в водах. Методика измерений гравиметрическим методом». Главное отличие состояло в том, что новые и отработанные фильтры просушивались в сушильном шкафу в течение суток, что позволило свести количество повторов этапа сушки – взвешивания до одного.

Концентрирование взвешенного вещества проводилось с использованием системы вакуумной фильтрации на мембранных фильтрах из нитрата целлюлозы (диаметр пор 0,45 мкм) на борту судна сразу после отбора пробы. Через единственный фильтр прокачивалось от 3,35 до 20,45 л морской воды. Объем фильтруемой воды зависел от концентрации взвешенного вещества в ней, которая в первом приближении оценивалась визуально по скорости фильтрации. Отфильтрованная вода накапливалась в пластиковых емкостях объемом 5 л. Определение объема воды, прокаченной через единственный фильтр, проводилось гравиметрическим методом в условиях минимальной качки. Для этого использовались электронные весы с погрешностью 1 г. По окончании фильтрации фильтр упаковывался в пластиковую чашку Петри и хранился при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до момента начала сушки фильтра в сушильном шкафу. Концентрация взвешенного вещества в воде рассчитывалась как отношение разности масс фильтра после и до прокачки воды к объему прокаченной воды.

**Определение концентрации тяжелых металлов.** В настоящем исследовании были выполнены измерения следующих тяжелых металлов: Pb, Zn, Ni,

Fe, Cr, V, Co. Их концентрация на фильтре определялась методом рентгено-флуоресцентного анализа на спектрометре СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM (НПО «СПЕКТРОН», Россия). Градуировка спектрометра была проведена с использованием комплектов градуировочных образцов ГХ-1 и ГХ-2 (НПО «СПЕКТРОН», Россия). Программное обеспечение «Спектр-Квант» (НПО «СПЕКТРОН», Россия) использовалось для управления работой спектрометра и получения количественных значений содержания ТМ на фильтре. Погрешность измерений составляла в среднем 17 % для Pb, 4 % для Zn, 6 % для Ni, 2 % для Fe, 5 % для Cr, 3 % для V, 36 % для Co. Минимально измеряемое содержание Pb и Zn 0,01 мкг, Cr – 0,02 мкг, Ni и Co – 0,03 мкг, V – 0,05 мкг, Fe – 0,06 мкг.

Значения объемной концентрации металлов во взвешенном веществе были рассчитаны нормированием значений содержания металлов на фильтре на объем воды, пропущенной через фильтр. Значения массовой концентрации металлов во взвешенном веществе были получены путем нормирования их объемной концентрации во взвешенном веществе на концентрацию взвешенного вещества.

**Гидрологические данные.** Измерения температуры и солёности в рейсе выполнялись с помощью океанографических зондов *IDRONAUT Ocean Seven 320 plus CTD* (*Idronaut S.R.L.*, Италия) и *Seasun CTD48* (*Sea & Sun Technology GmbH*, Германия). Погрешность определения температуры и солёности не превышала 0,002 °C и 0,01 соответственно.

Глубина перемешивания (*MLD*) определялась по вертикальному профилю температуры путем идентификации горизонта, на котором уменьшение температуры относительно поверхностного слоя достигает 0,5 °C.

**Статистический анализ.** Расчеты проводились с использованием *SPSS Statistics* (*IBM Corporation*). Для оценки взаимосвязей между исследуемыми параметрами в работе применялись коэффициенты корреляции Пирсона, позволяющие выявить линейные зависимости между количественными переменными. Значения коэффициентов корреляции считались статистически значимыми при уровне достоверности не ниже 95 % ( $p \leq 0,05$ ), что обеспечивало надежность выявленных связей и снижало вероятность случайных совпадений.

С целью оценки возможности применения методов многомерного статистического анализа были рассчитаны показатели меры адекватности выборки Кайзера – Майера – Олкина (КМО) для двух массивов данных. Первый массив включал данные об объемной концентрации ТМ, концентрации взвешенного вещества, глубине станции (*StD*) и глубине перемешивания. Во втором массиве данные об объемной концентрации ТМ были заменены на данные об их массовой концентрации. Данные о вертикальном распределении указанных параметров были исключены из обоих массивов. Значения показателя КМО составили 0,65 и 0,53 для первого и второго массивов, что соответствует удовлетворительному уровню адекватности выборки и указывает на пригодность массивов для дальнейшего анализа методом главных компонент. Дополнительно был применен критерий сферичности Бартлетта, позволяющий проверить гипотезу об отсутствии корреляций между переменными. Полученные значения уровня значимости ( $p < 0,001$  в обоих случаях) свидетельствуют

о наличии статистически значимых взаимосвязей между анализируемыми параметрами, что является необходимым условием для использования метода главных компонент (PC) и подтверждает целесообразность его применения.

Метод главных компонент был использован для выявления скрытых факторов, определяющих совместную изменчивость концентраций ТМ. Для повышения наглядности и облегчения интерпретации полученных факторов была применена ортогональная ротация Варимакс, направленная на максимизацию дисперсии факторных нагрузок. Использование данного метода ротации позволяет более четко разграничить вклад отдельных переменных в формирование факторов и способствует их интерпретации в терминах физических и геохимических процессов.

### Результаты и обсуждение

**Распределение тяжелых металлов в верхнем перемешанном слое вод моря.** Объемная концентрация (мкг/л) обсуждаемых ТМ изменялась по пространству в широком диапазоне: <0,01–0,24 для Pb; <0,03–2,61 для Zn; <0,01–0,12 для Ni; 1,07–36,71 для Fe; <0,02–0,24 для Cr; <0,02–0,36 для V; <0,02–0,25 для Co. Полученные данные не противоречат представленным в доступной литературе по Черному морю (табл. 1): 0,002–0,307 для Pb; 0,002–1,103 для Zn; 0,01–4,3 для Ni; 0,13–148 для Fe; 0,04–1,47 для Cr; 0,0003–0,87 для V; 0,0007–0,11 для Co.

Массовая концентрация (мкг/г) ТМ, так же как и объемная, изменялась по пространству в пределах двух порядков: <11–819 для Pb; <16–6240 для Zn; <19–390 для Ni; 10999–115930 для Fe; <20–663 для Cr; <59–1220 для V; <38–877 для Co. Приведенные значения концентрации не противоречат опубликованным данным (табл. 1): 2–251 для Pb; 6–2630 для Zn; 2–2200 для Ni; 130–130000 для Fe; 24–1867 для Cr; 1–97 для V; 0,4–39 для Co.

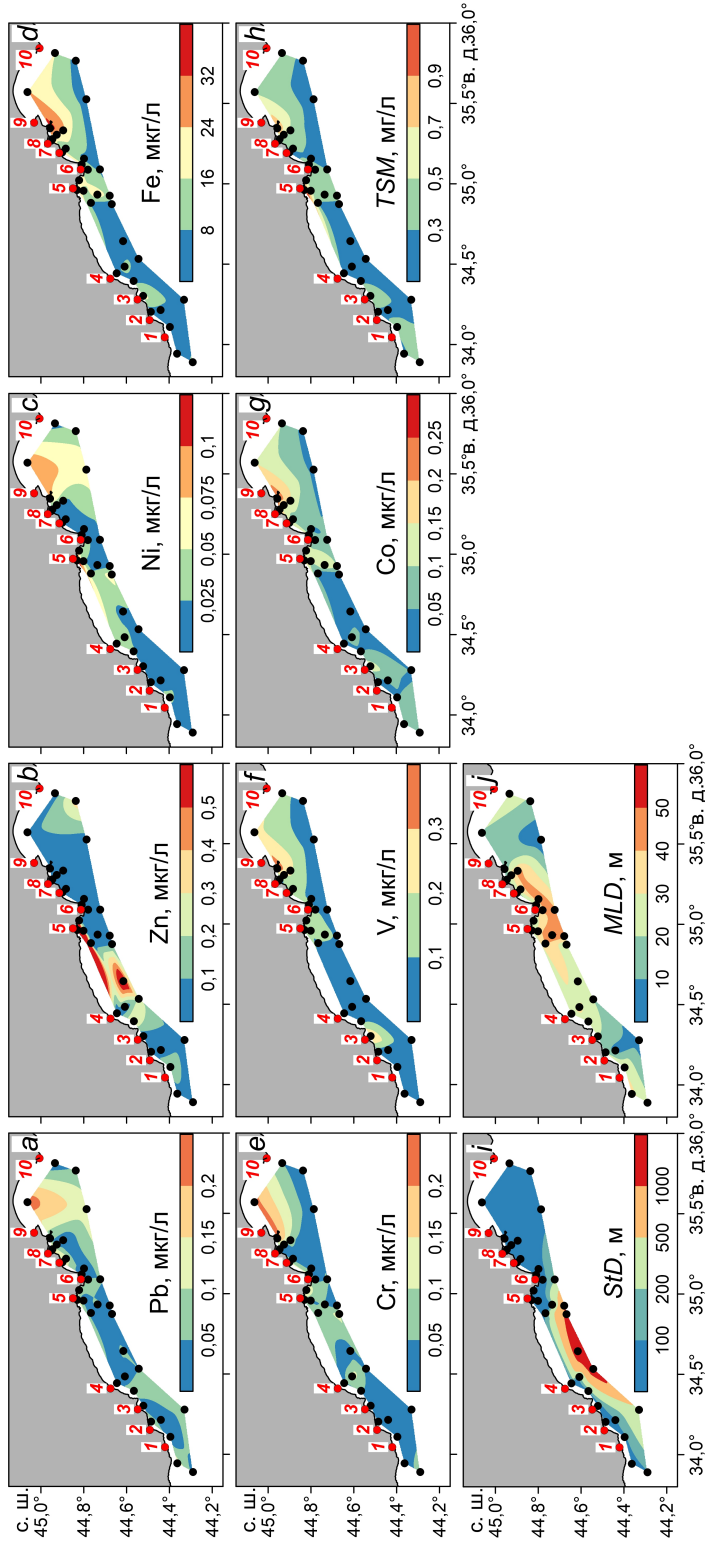
Пространственная изменчивость объемной концентрации ТМ имела сложный характер распределения (рис. 2). Повышенные и часто максимальные значения концентрации обсуждаемых ТМ отмечались в северо-восточной части исследуемого района – на шельфе от м. Меганом до м. Чауда. Пониженные значения концентрации были характерны для юго-западной части указанного района. Исключением был Zn, для которого повышенные значения наблюдались в глубоководной части этого района и в прибрежной зоне вблизи г. Судак. Примечательно, что для всех ТМ пониженные значения отмечались как на шельфе, так и в глубоководной части.

Выявленные особенности пространственной изменчивости объемной концентрации ТМ не противоречат данным, полученным для других районов Черного моря. Согласно результатам исследования, проведенного на северо-западном шельфе Черного моря и представленного в работе [29], объемная концентрация Fe во взвешенном веществе в поверхностных водах уменьшалась от шельфа к континентальному склону с 3,9 до 0,6 мкг/л соответственно. В работе [28] представлены данные об изменчивости объемной концентрации ТМ во взвешенном веществе на горизонте 10–20 м на разрезе от пролива Босфор в глубоководную часть Черного моря. Если сравнить данные, полученные на станции в проливе, с данными в глубоководной части, то можно увидеть, что концентрации всех ТМ снижаются. При сравнении данных, полученных только в глубоководной части этого разреза, можно отметить, что тенденция к снижению концентрации по мере отдаления от берега отмечается для Zn, Fe и V.

Таблица 1  
Table 1

**Объемная и массовая концентрация тяжелых металлов во взвешенном веществе  
в водах Черного моря согласно различным источникам  
Volume and mass concentrations of heavy metals in suspended matter  
in the Black Sea waters according to various sources**

ТМ	Объемная концентрация, мкг/л / Volume concentration, µg/l			Массовая концентрация, мкг/г / Mass concentration, µg/g					
	Это исследование / This study	[28]	[21]	[27]	[28]	[30]	[27]	[31]	
Pb	<0,01–0,24	0,006–0,27	0,074	0,002–0,307	<11–819	7–110	17	2–121	15–251
Zn	<0,03–2,61	0,002–0,91	1,103	0,009–0,496	<16–6240	6–100	67	12–359	20–2630
Ni	<0,01–0,12	0,008–4,3	0,071	0,001–0,123	<19–390	6–2200	47	2–36	–
Fe	1,07–36,71	0,27–193	–	0,13–148	10999–115930	164–5933	35200	116–130000	130–13100
Cr	<0,02–0,24	0,04–1,47	–	–	<20–663	24–1867	92	–	48–1161
V	<0,02–0,36	$0,3 \cdot 10^{-3}$ –0,87	–	–	<59–1220	1–14,0	97	–	–
Co	<0,02–0,25	$0,7 \cdot 10^{-3}$ –0,11	0,005	<0,001–0,026	<38–877	0,4–13	17,3	0,38–39	–



**Рис. 2.** Пространственная изменчивость концентрации различных металлов во взвешенном веществе (*a – g*) и взвешенного вещества (*h*) на глубине 3 м, а также данные о глубине перемешивания (*i*) и глубине перемешивания ТМ. Цифрами обозначены географические объекты: 1 – Алушка; 2 – Ялта; 3 – Гурзуф; 4 – Алушта; 5 – Судак; 6 – м. Меганом; 7 – Курортное; 8 – Коктебель; 9 – Феодосия; 10 – м. Чауда

**Fig. 2.** Spatial variability of concentrations of various metals in suspended matter (*a – g*) and suspended matter (*h*) at the 3-m depth, as well as the data on station (*i*) and mixing (*j*) depths at HM volume concentration. Numbers indicate the following geographical objects: 1 – Alupka, 2 – Yalta, 3 – Gurzuf, 4 – Alushia, 5 – Sudaak, 6 – Meganom cape, 7 – Kurortnoye settl., 8 – Koktebel settl., 9 – Feodosia, and 10 – Chauda cape

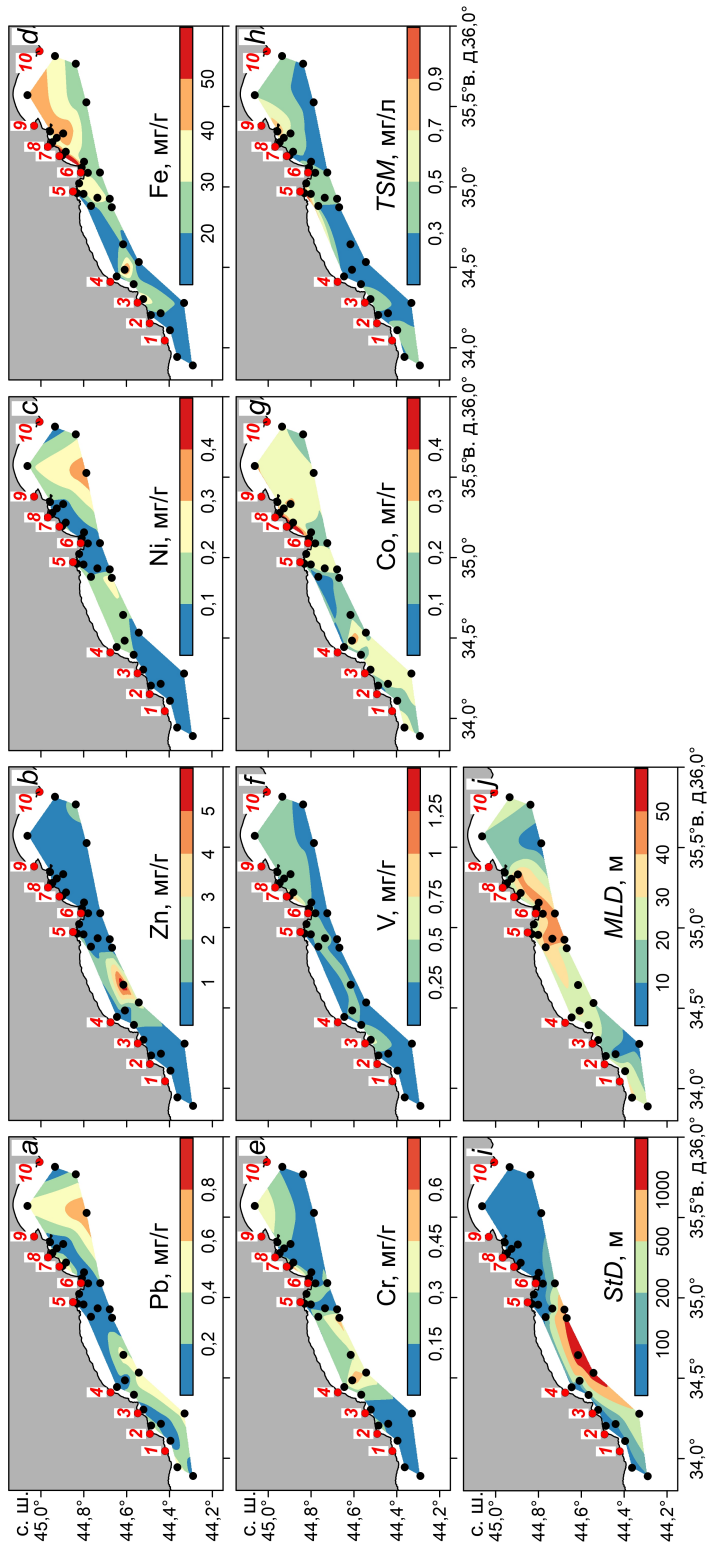


Рис. 3. То же, что на рис. 2, при массовой концентрации ТМ  
 Fig. 3. The same as in Fig. 2, at HM mass concentration

На рис. 3 приведены пространственные распределения обсуждаемых значений массовой концентрации ТМ. Повышенные значения Pb, Zn и Ni отмечались в глубоководной части моря, пониженные – в прибрежной. Повышенные значения Fe и V были характерны для участка шельфа от м. Меганом до м. Чауда, пониженные – для глубоководной части. Пространственная изменчивость Cr и Co имела более сложный характер: повышенные и пониженные значения наблюдались как на шельфе, так и в глубоководной части исследуемого района. Примечательно, что максимальные или близкие к ним значения массовой концентрации для большинства ТМ (Pb, Fe, Cr, V) были отмечены на шельфе в районе пгт Курортное.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Парные коэффициенты корреляции между объемной концентрацией тяжелых металлов (мкг/л), концентрацией взвеси (мг/л), глубиной места (м) и глубиной перемешивания (м)**  
**Paired correlation coefficients between the volume concentration of heavy metals ( $\mu\text{g/L}$ ), suspended matter concentration ( $\text{mg/L}$ ), station depth (m) and mixing depth (m)**

Параметр / Parameter	Pb	Zn	Ni	Fe	Cr	V	Co	TSM	StD	MLD
Pb	1,00	0,21	0,32	0,14	0,18	0,03	0,26	0,10	-0,17	-0,31
Zn	–	1,00	<b>0,56</b>	0,13	0,05	-0,02	0,16	<b>0,55</b>	0,10	-0,07
Ni	–	–	1,00	<b>0,38</b>	<b>0,56</b>	0,28	0,30	<b>0,49</b>	-0,09	-0,25
Fe	–	–	–	1,00	<b>0,65</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,76</b>	<b>-0,39</b>	0,03
Cr	–	–	–	–	1,00	<b>0,60</b>	<b>0,48</b>	<b>0,38</b>	-0,11	-0,18
V	–	–	–	–	–	1,00	<b>0,76</b>	<b>0,60</b>	<b>-0,39</b>	0,02
Co	–	–	–	–	–	–	1,00	<b>0,74</b>	<b>-0,35</b>	-0,01
TSM	–	–	–	–	–	–	–	1,00	<b>-0,36</b>	0,05
StD	–	–	–	–	–	–	–	–	1,00	-0,01
MLD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,00

П р и м е ч а н и е. Статистически значимые коэффициенты корреляции выделены красным цветом

N o t e: Statistically significant correlation coefficients are highlighted in red

Результаты корреляционного анализа указывают на наличие статистически значимых взаимосвязей между пространственной изменчивостью объемных концентраций отдельных ТМ (табл. 2). Такая связь наблюдалась в парах Fe – Ni ( $r = 0,38$ ), Fe – Cr ( $r = 0,65$ ), Fe – V ( $r = 0,90$ ), Fe – Co ( $r = 0,92$ ). Она может быть обусловлена как адсорбцией этих металлов Fe [27, 28], так и сходством их геохимического поведения, при котором изменчивость концентраций определяется одними и теми же физико-химическими процессами. Отсутствие значимых взаимосвязей Fe с Pb и Zn может указывать на различие в источни-

ках или стоках этих металлов в исследуемом районе. Пространственная изменчивость объемной концентрации большинства ТМ (Zn, Ni, Fe, Cr, V, Co) связана с пространственной неоднородностью поля концентрации взвешенного вещества: значения коэффициентов корреляции равны 0,55 (Zn), 0,49 (Ni), 0,76 (Fe), 0,38 (Cr), 0,60 (V), 0,75 (Co). Таким образом, чем больше взвешенного вещества содержится в единичном объеме морской воды, тем выше концентрация ТМ во взвешенном веществе. Статистически значимые отрицательные значения коэффициентов корреляции между глубиной места и объемной концентрацией Fe ( $r = -0,39$ ), V ( $r = -0,39$ ), Co ( $r = -0,35$ ) и взвешенного вещества ( $r = -0,36$ ) могут свидетельствовать о том, что в исследуемом районе источник этих металлов (например абразия берегов) расположен в шельфовой области.

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

**Парные коэффициенты корреляции между массовой концентрацией тяжелых металлов (мкг/г), концентрацией взвеси (мг/л), глубиной места (м) и глубиной перемешивания (м)**  
**Paired correlation coefficients between the mass concentration of heavy metals ( $\mu\text{g/g}$ ), suspended matter concentration ( $\text{mg/l}$ ), station depth (m) and mixing depth (m)**

Параметр / Parameter	Pb	Zn	Ni	Fe	Cr	V	Co	TSM	StD	MLD
Pb	1,00	0,31	0,30	0,10	0,12	0,06	<b>0,35</b>	<b>-0,41</b>	0,14	<b>-0,40</b>
Zn	–	1,00	0,20	-0,22	0,07	-0,15	-0,16	-0,11	<b>0,63</b>	-0,08
Ni	–	–	1,00	0,09	0,34	0,10	0,00	-0,23	0,13	-0,33
Fe	–	–	–	1,00	<b>0,56</b>	<b>0,92</b>	<b>0,86</b>	0,09	-0,26	-0,01
Cr	–	–	–	–	1,00	<b>0,52</b>	<b>0,37</b>	-0,19	0,25	-0,13
V	–	–	–	–	–	1,00	<b>0,71</b>	0,08	-0,29	0,02
Co	–	–	–	–	–	–	1,00	-0,04	-0,13	-0,12
TSM	–	–	–	–	–	–	–	1,00	<b>-0,36</b>	0,05
StD	–	–	–	–	–	–	–	–	1,00	-0,01
MLD	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,00

П р и м е ч а н и е. Статистически значимые коэффициенты корреляции выделены красным цветом

N o t e: Statistically significant correlation coefficients are highlighted in red

Результаты анализа (табл. 3) свидетельствуют о наличии статистически значимых взаимосвязей между изменением массовой концентрации Fe во взвешенном веществе и Cr ( $r = 0,56$ ), V ( $r = 0,92$ ), Co ( $r = 0,86$ ). Отсутствие статистически значимой связи Fe с Zn и Ni может быть обусловлено тем, что эти два тяжелых металла (Zn и Ni) имеют локальные стоки – активно потребляются фитопланктоном [32]. Отсутствие статистически значимой связи Fe с Pb может

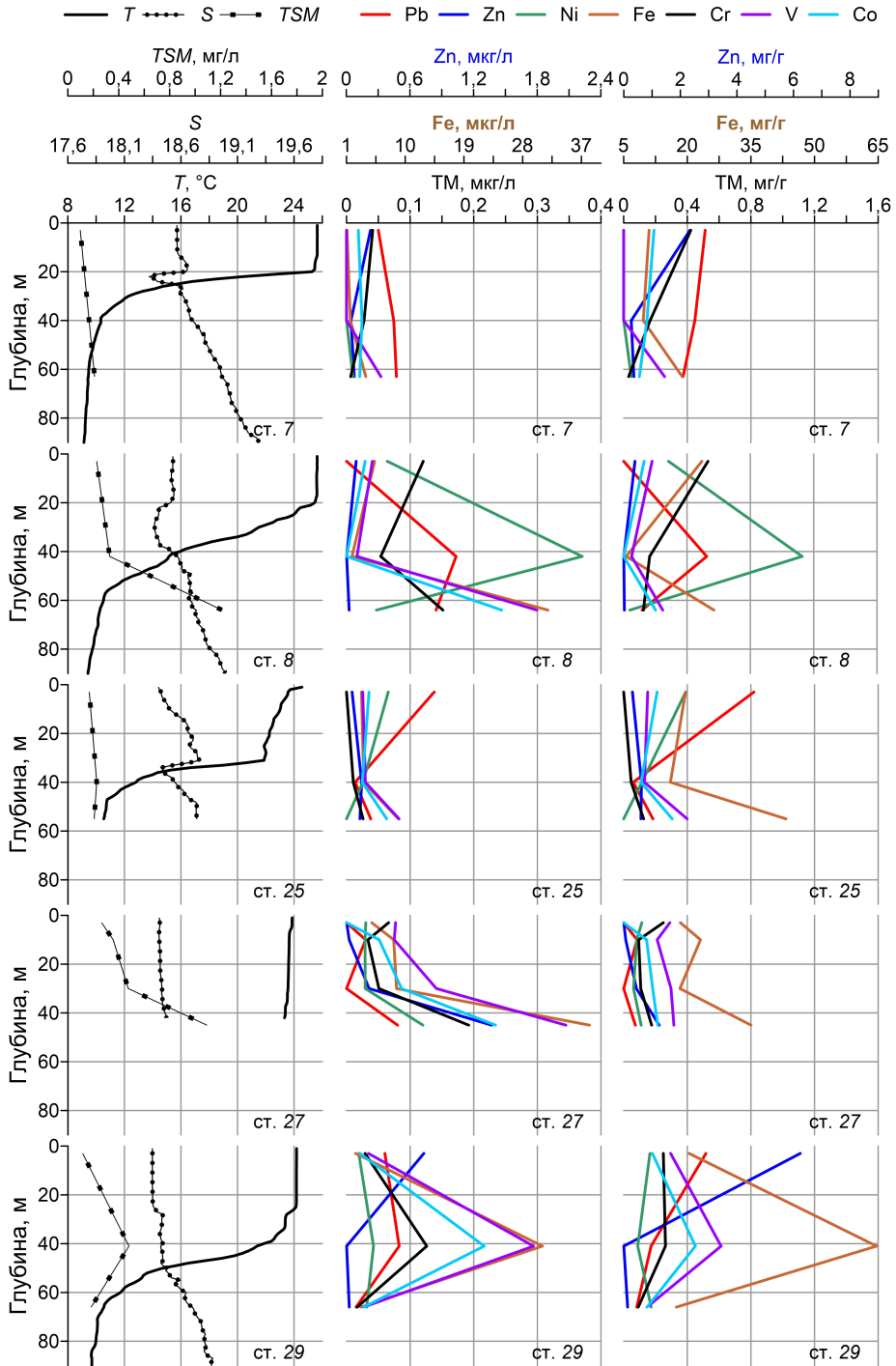
быть обусловлено различием в источниках поступления этих металлов. Сви-нец в морскую среду поступает преимущественно из атмосферы [33], но атмосферный поток является не единственным источником железа в морской среде. Примечательно, что только для Pb наблюдается статистически значимая корреляционная связь с изменением содержания взвешенного вещества ( $r = -0,41$ ): рост концентрации взвешенного вещества сопровождается уменьшением массовой концентрации Pb на взвеси. Вероятно, это связано с эффектом разбавления: на шельфе концентрация взвешенного вещества выше, чем в глубоководной части, вследствие присутствия дополнительных источников материала.

**Вертикальное распределение ТМ.** Вертикальные профили объемной и массовой концентрации металлов показаны на рис. 4.

На станциях, расположенных в глубоководной части Черного моря (ст. 7, 8, 29), отмечалось снижение с глубиной (сравнение данных на горизонтах 3 и 63–66 м) объемной и массовой концентрации Zn в 3,1–29,4 и в 6,6–47,1 раза соответственно, а также рост объемной концентрации Fe в 1,3–6,0 и Co в 1,1–8,3 раза. Массовая концентрация Fe во взвешенном веществе с глубиной как увеличивалась (в 1,1–1,7 раза), так и снижалась (в 1,2 раза). В отношении Co она увеличивалась в 1,6 и уменьшалась в 1,2–1,9 раза. Объемная концентрация остальных ТМ с глубиной как росла, так и снижалась: в 1,6 и 4–14 раз соответственно для Pb; в 1,6 и 1,4 – для Ni; в 1,3 и 1,7–6,25 – для Cr; в 5–7,4 и 1,3 раза – для V. Массовая концентрация этих металлов с глубиной также как возрастала, так и убывала: в 12 и 1,4–6,3 раза соответственно для Pb; в 1,1–5 и 7,3 раза – для Ni; в 1,4–26 и в 2 раза – для V. Массовая концентрация Cr с глубиной исключительно возрастала в 2,7–13,5 раза.

Полученные результаты хорошо согласуются с опубликованными. Анализируя данные, представленные в работе [28], можно отметить наличие тенденции к снижению с глубиной объемной концентрации Pb, Zn, Ni, V и Co.

На шельфе (ст. 25 и 27) с глубиной отмечался рост объемной и массовой концентрации большинства металлов: в 2,4–137 и в 2–125 раз соответственно для Zn; в 2,7–7,8 и в 1,9–2,2 раза – для Fe; в 3,2–4,5 и 1,1–2,6 раза – для V; в 1,8–23 и 1,5–21 раз – для Co. Объемная концентрация Cr с глубиной демонстрировала рост в 2,9–3 раза, в то время как его массовая концентрация на ст. 25 увеличивалась в 13 раз и снижалась в 1,4 раза на ст. 27. Объемная и массовая концентрации Pb увеличивались в 8 и 7 раз соответственно на ст. 27 и снижались в 3,6 и 4,4 раза на ст. 25. Объемная и массовая концентрации Ni на тех же станциях увеличивались в 4 и 39 раз и снижались в 7 и 1 раз соответственно. Отмеченный для большинства ТМ рост объемной концентрации во взвешенном веществе с глубиной, вероятно, обусловлен повышением концентрации взвеси. Как было показано выше при анализе пространственной изменчивости в верхнем перемешанном слое, увеличение концентрации взвешенного вещества сопровождается приращением объемной концентрации ТМ на взвеси. Увеличение массовой концентрации ТМ может быть обусловлено их адсорбцией на взвешенном веществе в процессе оседания последнего. Максимум концентрации взвешенного вещества в придонном слое может быть связан с уменьшением скорости его оседания вследствие снижения динамики вод.



**Р и с. 4.** Вертикальное распределение температуры, солености, концентрации взвешенного вещества, объемной и массовой концентрации тяжелых металлов на различных станциях  
**F i g. 4.** Vertical distribution of temperature, salinity, suspended matter concentration, and volume and mass concentrations of heavy metals at different stations

Согласно результатам исследования, проведенного на северо-западном шельфе Черного моря и представленного в работе [29], объемная концентрация Fe во взвешенном веществе увеличивается от поверхностного слоя к придонному в 5–46 раз. Авторами работы [27] отмечено наличие максимума концентрации Co, N, Zn в придонном слое, который был связан с максимумом Fe и объяснялся адсорбцией этих ТМ на нем.

Результаты корреляционного анализа (табл. 4 и 5) указывают на наличие сильной положительной взаимосвязи вертикального распределения объемных концентраций Fe и Cr ( $r = 0,86$ ), Fe и V ( $r = 0,99$ ), Fe и Co ( $r = 0,98$ ), Fe и концентрации взвешенного вещества ( $r = 0,89$ ). Массовая концентрация Fe коррелирует только с V ( $r = 0,98$ ) и Co ( $r = 0,85$ ). Этот результат указывает на общность в поведении Fe, V и Co в исследуемом районе. О наличии взаимосвязи вертикального распределения объемных концентраций Fe и Co отмечалось в работе [26], авторы которой указывали, что это связано с адсорбцией Co на Fe.

Т а б л и ц а 4  
T a b l e 4

**Парные коэффициенты корреляции между объемной концентрацией тяжелых металлов (мкг/л) и концентрацией взвеси (мг/л)**  
**Paired correlation coefficients between the volume concentration of heavy metals ( $\mu\text{g/L}$ ) and concentration of suspended matter ( $\text{mg/L}$ )**

Параметр / Parameter	Pb	Zn	Ni	Fe	Cr	V	Co	TSM
Pb	1,00	0,01	0,59	0,26	0,16	0,21	0,29	0,34
Zn	–	1,00	0,06	0,44	0,45	0,42	0,37	0,40
Ni	–	–	1,00	0,05	0,21	0,03	–0,01	0,19
Fe	–	–	–	1,00	<b>0,86</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	<b>0,89</b>
Cr	–	–	–	–	1,00	<b>0,84</b>	<b>0,81</b>	<b>0,82</b>
V	–	–	–	–	–	1,00	<b>0,97</b>	<b>0,89</b>
Co	–	–	–	–	–	–	1,00	<b>0,89</b>
TSM	–	–	–	–	–	–	–	1,00

П р и м е ч а н и е. Статистически значимые коэффициенты корреляции выделены красным цветом  
N o t e: Statistically significant correlation coefficients are highlighted in red

Отдельно стоит отметить влияние термоклина на вертикальное распределение ТМ. На ст. 29 срединная точка профиля расположена в верхней части термоклина. В слое термоклина по сравнению с горизонтом 3 м наблюдался прирост объемной концентрации всех металлов кроме Zn: Pb в 1,4; Ni в 2,2; Fe в 13; Cr в 4,3; V в 8,5; Co в 10,3 раза. Концентрация Zn была снижена в 73 раза. Увеличение объемной концентрации металлов может быть обусловлено как приращением концентрации взвешенного вещества в 4,1 раза, так и адсорбцией металлов в процессе его оседания. В пользу последнего свидетельствует повышение массовой концентрации Fe в 3,2; Cr в 1,1; V в 2,1; Co в 2,5 раза. Массовая концентрация снижалась для Pb в 3 раза, для Zn – в 62 раза, для Ni – в 1,9 раза. Снижение массовой концентрации этих металлов может быть обу-

словлено как их активным потреблением в верхних слоях, так и эффектом разбавления вследствие роста концентрации взвешенного вещества. Накопление взвешенного вещества в термоклине связано с ростом плотности [34]. Примечательно, что в нижней части термоклина (ст. 8) при росте концентрации взвешенного вещества в 1,5 раза отмечено повышение объемной концентрации только для Ni (в 5,8 раза) и Pb (в 17 раз). Значительный прирост (вплоть до двух порядков) концентрации отдельных металлов на единичных горизонтах в фотическом слое отмечался по данным работы [28].

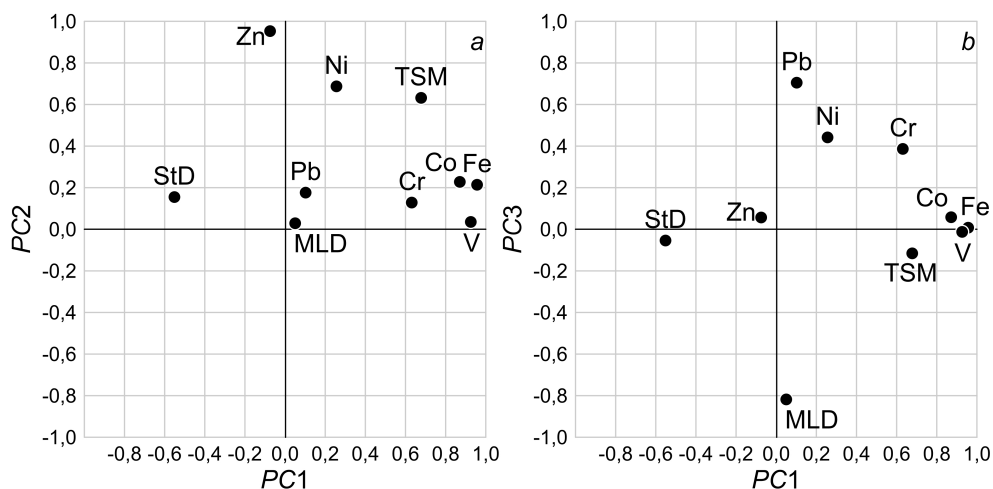
Т а б л и ц а 5  
T a b l e 5

**Парные коэффициенты корреляции между массовой концентрацией тяжелых металлов (мкг/г) и концентрацией взвеси (мг/л)**  
**Paired correlation coefficients between the mass concentration of heavy metals ( $\mu\text{g/g}$ ) and concentration of suspended matter ( $\text{mg/l}$ )**

Параметр / Parameter	Pb	Zn	Ni	Fe	Cr	V	Co	TSM
Pb	1,00	0,33	0,37	-0,31	-0,14	-0,38	-0,01	-0,38
Zn	-	1,00	-0,11	-0,10	0,27	0,01	0,07	-0,21
Ni	-	-	1,00	-0,33	-0,01	-0,30	-0,43	-0,10
Fe	-	-	-	1,00	0,08	<b>0,90</b>	<b>0,85</b>	0,33
Cr	-	-	-	-	1,00	-0,03	0,05	-0,12
V	-	-	-	-	-	1,00	<b>0,65</b>	0,32
Co	-	-	-	-	-	-	1,00	0,21
TSM	-	-	-	-	-	-	-	1,00

П р и м е ч а н и е. Статистически значимые коэффициенты корреляции выделены красным цветом  
N o t e: Statistically significant correlation coefficients are highlighted in red

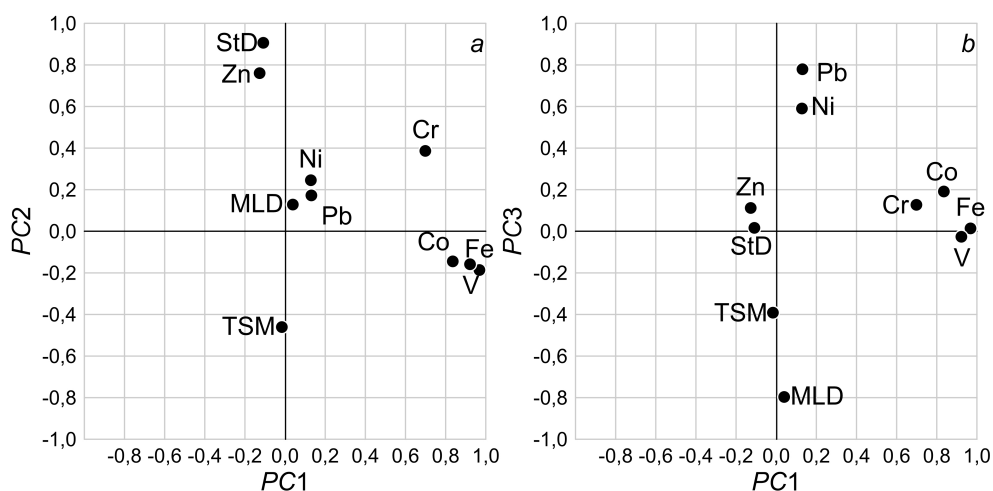
**Метод главных компонент.** Анализ данных об объемной концентрации ТМ методом главных компонент (PC) позволил выделить 3 компоненты (рис. 5). Первая компонента объясняет 43,1 % изменчивости анализируемого ряда, вторая – 17,3 %, третья – 12,3 %. Первая компонента связана с изменчивостью Fe, V, Co, Cr и концентрации взвешенного вещества и, вероятно, отражает влияние природного литогенного фактора (абразия берега, проникновение азовоморских вод, атмосферный перенос) [7, 26–28]. Вторая компонента связана с Zn, Ni и концентрацией взвешенного вещества и, вероятно, отражает влияние природного биогенного фактора (продукция фитопланктона, адсорбция на органическом веществе). Третья компонента связана с Pb и глубиной перемешивания и, вероятно, отражает влияние гидродинамических процессов: Pb в морскую среду поступает с атмосферным аэрозолем, снижение объемной концентрации Pb с ростом глубины перемешивания говорит о его разбавлении в большем объеме.



**Р и с. 5.** Графическое представление первой и второй (а), первой и третьей (b) компонент при объемной концентрации ТМ

**F i g. 5.** Graphical representation of the first and second (a), and the first and third (b) components at HM volume concentration

Анализ данных о массовой концентрации ТМ методом главных компонент также позволил выделить 3 компоненты (рис. 6). Первая компонента объясняет 31,7 % изменчивости анализируемого ряда, вторая – 23,7 %, третья – 12,6 %. Связь выделенных факторов с анализируемыми параметрами принципиально не изменилась по сравнению с результатами, описанными выше, что лишь подтверждает адекватность сделанных предположений о природе процессов, контролирующих пространственную изменчивость содержания ТМ во взвешенном веществе в анализируемом районе.



**Р и с. 6.** Графическое представление первой и второй (а), первой и третьей (b) компонент при массовой концентрации ТМ

**F i g. 6.** Graphical representation of the first and second (a), and the first and third (b) components at HM mass concentration

## Выводы

В настоящей работе представлены результаты анализа натуральных данных о пространственной изменчивости объемной и массовой концентрации тяжелых металлов (Pb, Zn, Ni, Fe, Cr, V, Co) во взвешенном веществе, полученные в северной части Черного моря. Значения объемной и массовой концентрации анализируемых металлов изменялись по пространству в пределах двух порядков. Повышенные и часто максимальные значения объемной концентрации указанных тяжелых металлов отмечались в северо-восточной части исследуемого района, пониженные значения были характерны для юго-западной части. Пространственная изменчивость массовой концентрации тяжелых металлов имела более сложный характер. Повышенные значения Pb, Zn и Ni отмечались в глубоководной части моря, пониженные – в прибрежной. Повышенные значения Fe и V были характерны для участка шельфа от м. Меганом до м. Чауда, пониженные – для глубоководной части. Повышенные и пониженные концентрации Cr и Co наблюдались как на шельфе, так и в глубоководной части исследуемого района.

В глубоководной части моря массовая и объемная концентрация анализируемых металлов с глубиной (при сравнении слоя 3 м со слоем 63–66 м) как увеличивалась, так и уменьшалась. В верхней части термоклина отмечался рост объемной (Pb, Ni, Fe, Cr, V, Co) и массовой (Fe, Cr, V, Co) концентрации большинства тяжелых металлов в 1,1–47,1 раза. Рост в 1,1–137 раз объемной (Zn, Fe, Cr, V, Co) и массовой (Zn, Fe, V, Co) концентрации большинства тяжелых металлов отмечен и на шельфе в придонном слое. Такое приращение обусловлено совместным влиянием по крайней мере двух процессов – накопления взвешенного вещества вследствие снижения динамики вод и адсорбции этих металлов на оседающем взвешенном веществе.

С использованием метода главных компонент показано, что пространственная изменчивость объемной и массовой концентрации Fe, V, Co, Cr связана с влиянием литогенного фактора (абразия берега, проникновение азотовых вод, вынос пыли), изменчивость Zn и Ni обусловлена влиянием биогенного фактора (продукция фитопланктона, адсорбция на органическом веществе), изменчивость Pb – влиянием гидродинамического фактора (изменчивость глубины перемешивания).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heavy metals and living systems: An overview / R. Singh [et al.] // *Indian Journal of Pharmacology*. 2011. Vol. 43, iss. 3. P. 246–253. <https://doi.org/10.4103/0253-7613.81505>
2. *Stancheva M., Makedonski L., Peycheva K.* Determination of heavy metal concentrations of most consumed fish species from Bulgarian Black Sea coast // *Bulgarian Chemical Communications*. 2014. Vol. 46, iss. 1. P. 195–203.
3. Heavy Metal Contamination in the Aquatic Ecosystem: Toxicity and Its Remediation Using Eco-Friendly Approaches / V. Singh [et al.] // *Toxics*. 2023. Vol. 11, iss. 2. 147. EDN ZFIEZU. <https://doi.org/10.3390/toxics11020147>
4. Ecotoxicology of hexavalent chromium in fish: An updated review / S. Kamila [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 890. 164395. EDN YWLGGG. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164395>

5. *Srivastav A., Srivastav S. K., Upadhyay R. K.* Physiological and Behavioral Effects of Lead Poisoning in Aquatic and Marine Animals: Review // *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 2024. Vol. 13, iss. 6. P. 171–185. <https://doi.org/10.20959/wjpps20246-27390>
6. A Systematic Review on Contamination of Marine Species by Chromium and Zinc: Effects on Animal Health and Risk to Consumer Health / A. M. Ramos-Filfo [et al.] // *Journal of Xenobiotics*. 2025. Vol. 15, iss. 4. 121. EDN DOLLGS. <https://doi.org/10.3390/jox15040121>
7. *Bruland K. W.* Trace elements in Seawater // *Chemical Oceanography* / Eds. J. R. Riley, R. Chester. London : Academic Press, 1983. Vol. 8. P. 157–220.
8. *Mason A. Z., Jenkins K. D.* Metal detoxification in aquatic organisms // *Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems* / Eds. A. Tessier, D. R. Turner. London : John Wiley & Sons Ltd., 1995. P. 479–608.
9. Study of Heavy Metal Pollution and Bioaccumulation in the Black Sea Living Environment / O. Jitar [et al.] // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013. Vol. 12, iss. 2. P. 271–276. EDN YDZTBR. <https://doi.org/10.30638/eemj.2013.032>
10. 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>
11. Particulate pollution and its toxicity to fish: An overview / T. Gokul [et al.] // *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 2023. Vol. 270. 109646. EDN NJKJYQ. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109646>
12. Features of Heavy Metals Accumulation in Bottom Sediments of the Southern Bug Hydroecosystem / O. Mityrasova [et al.] // *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21, iss. 3. P. 51–60. EDN EAVLYC. <https://doi.org/10.12911/22998993/118299>
13. *Manev I., Kirov V., Neshovska H.* Heavy Metals Accumulation in Black Sea Ecosystems: Seawater, Sediment, Algae, Benthic Organisms // *Tradition and Modernity in Veterinary Medicine*. 2020. Vol. 5, iss. 2(9). P. 88–99.
14. *Butnariu M.* Heavy metals as pollutants in the aquatic Black Sea ecosystem // *Bacterial Fish Diseases* / Eds. G. H. Dar, R. A. Bhat, H. Quadri, K. M. Al-Ghamdy, K. M. Hakeem. Academic Press, 2022. P. 31–57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85624-9.00003-8>
15. *Nemirovskaya I. A., Zavialov P. O., Khramtsova A. V.* Hydrocarbon pollution in the waters and sediments of the Kerch Strait // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 180. 113760. EDN FGPZHD. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113760>
16. *Haraldsson C., Westerlund S.* Total and Suspended Cadmium, Cobalt, Copper, Iron, Lead, Manganese, Nickel and Zinc in the Water Column of the Black Sea // *Black Sea Oceanography* / Eds. E. Izdar, J. W. Murray. Dordrecht : Springer, 1991. P. 161–172. (NATO ASI Series ; vol. 351). [https://doi.org/10.1007/978-94-011-2608-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2608-3_9)
17. *Lewis B. L., Landing W. M.* The biogeochemistry of manganese and iron in the Black Sea // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1991. Vol. 38. P. S773–S803. [https://doi.org/10.1016/S0198-0149\(10\)80009-3](https://doi.org/10.1016/S0198-0149(10)80009-3)
18. *Konovalov S. K., Murray J. W.* Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995) // *Journal of Marine Systems*. 2001. Vol. 31, iss. 1–3. P. 217–243. EDN VOQXKP. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(01\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00054-9)
19. *Кораблина И. В., Барабахин Т. О., Катаевский Н. И.* Тяжелые металлы в донных отложениях шельфа северо-восточной части Черного моря в современный период // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 5. С. 591–609. EDN POFJWM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-5-591-609>
20. 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>
21. Взвешенное вещество как биогеохимический барьер для тяжёлых металлов в районах размещения морских ферм (Севастополь, Чёрное море) / Н. В. Поспелова [и др.] // *Морской биологический журнал*. 2022. Т. 7, № 4. С. 55–69. EDN CMZHZH. <https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.05>

22. *Gurov K. I., Kurinnaya Yu. 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. Cham : Springer Geology. 2021. Vol. 3. P. 119–130. EDN TURZBO. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3_12)
23. *Кременчуцкий Д. А., Гурова Ю. С.* Факторы формирования пространственного распределения природных и техногенных радионуклидов в донных отложениях Камышовой бухты, Севастополь // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 5. С. 692–707. EDN FYRBGS.
24. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натуральных измерений 2019–2020 гг. / П. О. Завьялов [и др.] // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 2. С. 194–203. EDN YHPENI. <https://doi.org/10.31857/S0030157422020174>
25. Тяжёлые металлы в прибрежных водах российского сектора Чёрного и Азовского морей / О. Д. Чужикова-Проскурнина [и др.] // *Экосистемы*. 2022. №. 31. С. 111–122. EDN VUBCIT.
26. *Lewis B. L., Landing W. M.* The investigation of dissolved and suspended-particulate trace metal fractionation in the Black Sea // *Marine Chemistry*. 1992. Vol. 40, iss. 1–2. P. 105–141. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(92\)90050-K](https://doi.org/10.1016/0304-4203(92)90050-K)
27. Trace metal distributions in shelf waters of the northwestern Black Sea / S. P. C. Tankéré [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2001. Vol. 21, iss. 13–14. P. 1501–1532. EDN XNVDDV. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00013-9)
28. *Yığiterhan O., Murray J. W., Tuğrul S.* Trace metal composition of suspended particulate matter in the water column of the Black Sea // *Marine Chemistry*. 2011. Vol. 126, iss. 1–4. P. 207–228. EDN YBYHZD. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.05.006>
29. The shelf-to-basin iron shuttle in the Black Sea revisited / W. K. Lenstra [et al.] // *Chemical Geology*. 2019. Vol. 511. P. 314–341. EDN WZXFEN. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.10.024>
30. *Rudnick R. L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry* (Second Edition) / Eds. H. D. Holland, K. K. Turekian. Oxford : Elsevier, 2014. Vol. 4. P. 1–51. EDN UUUMDJ. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
31. *Денисов В. И., Латун В. В.* Потоки химических элементов в составе осаждающегося взвешенного вещества на шельфе Чёрного моря (по данным седиментационных ловушек) // *Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2018. № 4. С. 77–85. EDN YSAVSH. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2018-4-77-85>
32. *Chan C. Y., Zheng L., Sohrin Y.* The behaviour of nickel, copper, zinc, and cadmium in the subarctic Pacific Ocean: East–West differences // *Journal of Oceanography*. 2025. Vol. 81, iss. 2. P. 149–162. EDN FLBJU. <https://doi.org/10.1007/s10872-025-00746-y>
33. Anthropogenic Lead (Pb) deposition history of the western Indian Ocean from coral-based Pb/Ca ratio and Pb isotope records / W. Rahaman [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 955, iss. 10. 177312. EDN JKVWVKU. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177312>
34. Formation Mechanisms and Characteristics of the Marine Nepheloid Layer: A Review / Z. Tian [et al.] // *Water*. 2022. Vol. 14, iss. 5. 678. EDN LHAUOI. <https://doi.org/10.3390/w14050678>

*Об авторах:*

**Кременчуцкий Дмитрий Александрович**, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8747-6612**, **ResearcherID: AAC-1673-2020**, **SPIN-код: 1695-9378**, [d.kremenchutsky@gmail.com](mailto:d.kremenchutsky@gmail.com)

**Котельянец Екатерина Александровна**, младший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **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)