

Влияние паводкового стока на содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная

О. Д. Чужикова *, В. Ю. Проскурнин, А. А. Параскив,
Н. Ю. Мирзоева

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

* e-mail: chuzhikova@ibss-ras.ru

Аннотация

Исследовано влияние паводкового стока на содержание микроэлементов (металлов и металлоидов) в воде рек Кача, Бельбек и Черная в окрестностях Севастополя в 2024 г. В паводковый (март 2024 г.) и засушливый (июль 2024 г.) периоды в речной воде были определены концентрации растворенных форм ряда элементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag), в том числе тяжелые металлы, а также их общие концентрации, включающие растворенные формы и связанные со взвешенным веществом. Содержание всех изучаемых элементов определяли в их кислотных концентратах и минерализатах в соответствии с ГОСТ Р 56219–2014 методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant MS Elite* (Analytik Jena, Германия). Установлено, что в паводковый период в р. Кача и Бельбек концентрация взвешенного вещества увеличилась более чем в 100 раз, в то время как в р. Черной этот показатель вырос в 2.5 раза. Полученные данные позволили выявить критические элементы, у которых концентрации растворенных форм или общие концентрации превышали установленные нормы. Так, обнаружено превышение ПДК в воде рыбохозяйственных водоемов для растворенных форм меди и цинка. Анализ общих концентраций микроэлементов с использованием нормативов «Голландских листов» показал более широкий перечень загрязнителей в паводок: в реках Кача и Бельбек зафиксированы превышения ПДК никеля, меди, цинка, ванадия, а также кобальта и бериллия (только в реке Кача). Интегральная оценка по индексу загрязненности подтвердила ухудшение качества воды в паводковый период на 1–2 класса: в реках Кача и Бельбек до III класса (умеренно загрязненная), в реке Черной – до II класса (чистая). Кроме того, проанализировано распределение микроэлементов в системе вода – взвешенное вещество и установлен преобладающий вклад взвешенного вещества в общее содержание микроэлементов в речной воде в паводковый и сухой периоды. Оценена аккумулирующая способность взвешенного вещества в отношении исследуемых микроэлементов: коэффициенты накопления для различных элементов варьировали от $n \cdot 10^3$ до $n \cdot 10^7$, что подтвердило ведущую роль взвеси в процессах

© Чужикова О. Д., Проскурнин В. Ю., Параскив А. А.,
Мирзоева Н. Ю., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

самоочищения вод от загрязнителей и перераспределения микроэлементов между компонентами водных экосистем. Полученные результаты обосновывают необходимость учета взвешенных форм микроэлементов при мониторинге качества вод, используемых для питьевого водоснабжения, особенно в паводковые периоды.

Ключевые слова: тяжелые металлы, растворенная форма элемента, взвешенная форма элемента, общая концентрация элемента, взвешенное вещество, коэффициент накопления, предельно допустимая концентрация, индекс загрязненности воды, паводковый сток, межень, река Черная, Севастополь, Крым

Благодарности: работа выполнена по теме госзадания ФИЦ ИнБЮМ «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозокологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (№ гос. регистрации 124030100127-7).

Для цитирования: Чужикова О. Д., Проскурнин В. Ю., Параскив А. А., Мирзоева Н. Ю. Влияние паводкового стока на содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 85–104. EDN DXWQGC.

The Influence of Flood Runoff on the Content of Trace Elements in the Water of the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers

O. D. Chuzhikova*, V. Yu. Proskurnin, A. A. Paraskiv, N. Yu. Mirzoeva

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

** e-mail: chuzhikova@ibss-ras.ru*

Abstract

The article studies the impact of flood runoff on the content of trace elements (metals and metalloids) in the water of the Kacha, Belbek and Chernaya rivers near Sevastopol in 2024. During the flood (March 2024) and dry (July 2024) periods, the concentrations of a number of elements (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag), including heavy metals, as well as their total concentrations including dissolved forms and those associated with suspended matter were determined in river water. The content of all studied elements was determined in their acidic concentrates and leachates from samples in accordance with State Standard of Russia 56219-2014 by mass spectrometry with inductively coupled plasma on a PlasmaQuant MS Elite mass spectrometer (Analytik Jena, Germany). It was found that during the flood period, the suspended matter concentration in the Kacha and Belbek Rivers increased by over 100 times, while in the Chernaya River it increased by 2.5 times. The obtained data allowed identification of critical elements whose dissolved or total concentrations exceeded the established standards. Thus, the dissolved copper and zinc were detected to exceed the maximum permissible concentrations for fishery waters. An analysis of total trace elements concentrations using Dutch standards resulted in a wider list of pollutants during the flood: the nickel, zinc, copper and vanadium concentrations in the Kacha and Belbek Rivers exceeded the MPC. The cobalt and beryllium contents were also higher than the MPC (only in the Kacha River). An integral assessment by pollution

index confirmed the water quality deterioration by 1–2 classes during the flood: down to class III (moderately polluted) in the Kacha and Belbek Rivers and down to class II (clean) in the Chernaya River. Moreover, the paper analyses trace elements distribution in the water–suspended matter system and shows a predominant contribution of suspended matter to the total content of trace elements in the river water during the flood and low water. The accumulation capacity of suspended matter in relation to the studied trace elements was assessed. The concentration factors for various elements varied from $n \cdot 10^3$ to $n \cdot 10^7$, which confirmed the leading role of suspended matter in processes of water self-purification from pollutants and redistribution of trace elements among the components of aquatic ecosystems. The results ground the necessity to consider suspended forms of trace elements within monitoring the drinking water quality, especially during floods.

Keywords: heavy metals, element dissolved form, element suspended form, total element concentration, suspended matter, concentration factor, maximum permissible concentration, water pollution index, flood runoff, low water, Chernaya River, Sevastopol, Crimea

Acknowledgments: The work was carried out under the state assignment of the FRC IBSS RAS “Study of biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in the ecosystems of water bodies of the Azov-Black Sea basin in comparison with other water areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their catchment basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia” (state registration number 124030100127-7).

For citation: Chuzhikova, O.D., Proskurnin, V.Yu., Paraskiv, A.A. and Mirzoeva, N.Yu., 2026. The Influence of Flood Runoff on the Content of Trace Elements in the Water of the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 85–104.

Введение

Реки Кача, Бельбек и Черная относятся к основным рекам Крыма и Севастополя, каждая из них имеет годовой объем стока 50–75 млн м³ пресной воды. Из-за дефицита воды на полуострове сток рек зарегулирован с помощью водохранилищ, прудов и водозаборов, используемых как для орошения, так и для водоснабжения населенных пунктов [1]. Реки Крыма относятся к рекам с паводочным режимом крымского подтипа, для которого характерны зимние и осенние дождевые паводки и длительные летний (июнь – август) или летне-осенний (май – октябрь) периоды с очень малым водным стоком [2]. В засушливый период уровень воды в реках резко падает вплоть до полного пересыхания, а в периоды паводков наблюдается подъем уровня на 1 м и более, в отдельных случаях – до 2–6 м [3]. В паводковый период мутность рек резко возрастает, а качество вод формируется под влиянием продуктов водной эрозии почвенного покрова водосборного бассейна (продукты смыва) и эрозии русла (продукты размыва) [4–6]. Таким образом, паводки представляют реальную угрозу здоровью населения, поскольку может временно ухудшаться качество воды в источниках питьевого водоснабжения ¹⁾

¹⁾ Гончаров С. Ф., Батрак Н. И., Сахно И. И., Суранова Т. Г. и др. Мониторинг санитарно-эпидемиологической обстановки в зонах подтопления и катастрофического наводнения / Под ред. Л. И. Иванишиной. Москва : Всероссийский центр медицины катастроф «Защита» Минздрава России, 2014. 36 с. EDN YABMRP.

из-за поступления химических, органических и биологических загрязнений с водами паводкового стока [7].

Одним из основных показателей качества питьевой воды является содержание микроэлементов, включая ряд тяжелых металлов, которые могут оказывать токсическое действие на организм человека²⁾. Систематический мониторинг загрязнения поверхностных вод в регионах проводят лаборатории под руководством Росгидромета, обобщая данные в ежегодном издании «Качество поверхностных вод Российской Федерации»³⁾. Однако существующая система учета рассматривает только растворенные формы микроэлементов.

В то же время в паводковый период содержание взвеси в речной воде может значительно увеличиваться. Существующие системы очистки воды, применяемые в системе городского водоснабжения, в критические моменты могут не справляться с полным удалением взвешенных частиц, и вода может поступать населению с остаточным содержанием взвеси, на которой сорбируются химические вещества. Это обуславливает целесообразность исследования общего содержания микроэлементов в речной воде с учетом растворенных и взвешенных форм элементов, а также изменения качества речной воды в паводковый период.

Полномасштабный мониторинг рек Севастополя в разные сезоны года с одновременным отбором проб воды и взвешенного вещества для анализа содержания микроэлементов проводился ранее на р. Черной [8]. На р. Кача и Бельбек подобные исследования не проводились, что определяет актуальность данной работы.

Цель исследования состоит в изучении распределения микроэлементов (в растворенной и взвешенной формах) в воде севастопольских рек Кача, Бельбек и Черная в паводковый и засушливый периоды и оценке влияния паводкового стока на качество воды исследуемых рек.

Материал и методы

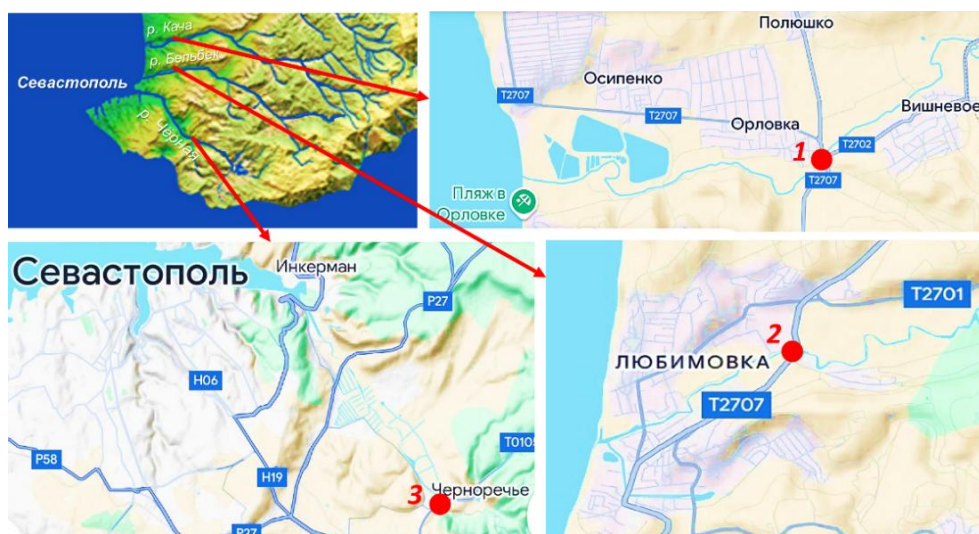
Для определения микроэлементов, включая тяжелые металлы (ТМ), пробы воды и взвешенного вещества в ней отбирали в нижнем течении р. Кача, Бельбек и Черная в окрестностях Севастополя (рис. 1) в марте и июле 2024 г., что соответствовало периодам высокого и низкого уровня воды – разница в уровнях воды на всех реках составила около полуметра (рис. 2).

Сразу после отбора проб воды в лабораторных условиях отделяли взвешенное вещество с помощью вакуумной фильтрации через ацетат-целлюлозные мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Концентрацию общего взвешенного вещества определяли гравиметрическим методом в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:3.110-97⁴⁾.

²⁾ *Чертко Н. К., Таранчук А. В., Чертко Э. Н., Будько Д. А.* Биологическая функция химических элементов : справочное пособие / Под ред. Н. К. Чертко. Минск : Четыре четверти, 2012. 172 с. EDN IQXSRX.

³⁾ *Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2023* / под ред. М. М. Трофимчука. Ростов-на-Дону : ФГБУ «Гидрохимический институт», 2024. 597 с.

⁴⁾ ПНДФ 14.1:2:3.110-97. Методика измерений массовой концентрации взвешенных веществ в пробах природных и сточных вод гравиметрическим методом. Москва, 2016. 15 с.



Р и с. 1. Карта-схема района работ и точек отбора проб в окрестностях г. Севастополя: 1 – р. Кача (Орловский мост, 44.726500° с. ш., 33.590981° в. д.); 2 – р. Бельбек (Любимовский мост, 44.669705° с. ш., 33.564247° в. д.); 3 – р. Черная (гидрологический пост около с. Хмельницкое, 44.545080° с. ш., 33.662357° в. д.)

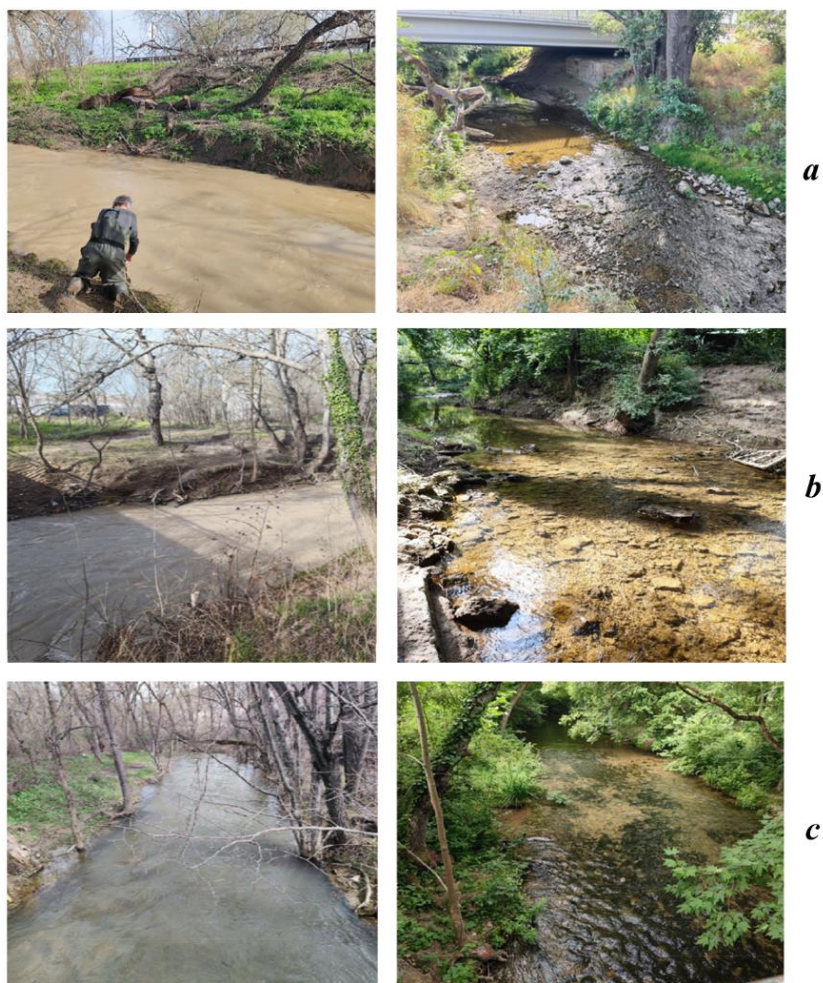
Fig. 1. Schematic map of the study area and sampling points around Sevastopol: 1 – the Kacha River (Orlovka Bridge, 44.726500° N, 33.590981° E); 2 – the Belbek River (Lyubimovka Bridge, 44.669705° N, 33.564247° E); 3 – Chernaya River (gauging station near the village of Khmelnitskoye, 44.545080° N, 33.662357° E)

Из воды растворенные формы определяемых элементов извлекали путем экстракционного концентрирования в виде диэтилдитиокарбаматов с использованием четыреххлористого углерода в соответствии с РД 52.10.243–92⁵⁾. Из взвешенного вещества определяемые элементы извлекали путем кислотной минерализации с последующим фильтрованием в соответствии с ПНД Ф 16.2.2:2.3.71–2011⁶⁾. Концентрации изучаемых элементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Tl, Pb) в кислотных концентратах и минерализатах измеряли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant Ms Elite (Analytik Jena, Германия)* в соответствии с ГОСТ Р 56219–2014⁷⁾ на базе НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Масс-спектрометр калибровали с помощью

⁵⁾ РД 52.10.243–92. Руководство по химическому анализу морских вод. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1993. 264 с.

⁶⁾ ПНД Ф 16.2.2:2.3.71–2011. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. Москва : Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия (ФБУ «ФЦАО»), 2011.

⁷⁾ ГОСТ Р 56219–2014. Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Москва : Стандартинформ. 2015. 36 с.



Р и с . 2 . Состояние р. Кача (a), Бельбек (b) и Черная (c) в момент отбора проб: паводковый период (слева) и межень (справа)

Fig. 2. State of the Kacha (a), Belbek (b) and Chernaya (c) Rivers during sampling: the flood period (left) and low-water period (right)

стандартного раствора «Калибровочный стандарт многоэлементный IV-28, HNO_3/HF , 125 мл» (*Inorganic Ventures*) путем построения калибровочной прямой по растворам со степенями разбавления стандарта, охватывающими весь диапазон определяемых концентраций элементов. Процедура измерения включала не менее семи повторностей для каждого измеряемого элемента в каждой пробе. Время измерения определялось интенсивностью отклика детектора на присутствие того или иного элемента в растворе и варьировалось от 0.01 до 0.1 с. Для всех измеряемых элементов определяли относительную погрешность измерения, которая не превышала 10 %.

Для оценки степени загрязненности речных вод полученные значения концентраций элементов сравнивали с предельно допустимыми концентрациями

(ПДК), установленными СанПиН 1.2.3.3685-21⁸⁾ для поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_{хп}), а также с ПДК вредных веществ в воде водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}), рекомендуемыми приказом Росрыболовства⁹⁾. Для сопоставления с иностранными нормативами использовали «Голландские листы»¹⁰⁾.

В отличие от отечественных нормативных документов в «Голландских листах» нормируются не только концентрации растворенных форм микроэлементов в воде (ПДК_{гл}), но и их общие концентрации (ПДК_{общ}), включающие растворенные и взвешенные формы элементов. Это особенно актуально в паводковый период, когда мутность воды в реках резко возрастает. Нормативные значения из перечисленных выше документов для ряда элементов приведены в табл. 1.

Качество воды в реках оценивалось путем расчета индекса загрязненности вод (ИЗВ) для приоритетных загрязнителей¹¹⁾. К приоритетным загрязнителям относили те элементы, для которых отношение измеренной концентрации к ПДК было наибольшим. В случае, когда концентрации всех элементов не превышали ПДК, в число приоритетных включали элементы со значениями, максимально приближенными к нормативу. В обязательном порядке ИЗВ включает такие показатели, как растворенный кислород и биологическое потребление кислорода за пять суток (БПК₅). В настоящей работе оценка этих показателей не проводилась, а ИЗВ рассчитывался исключительно в отношении содержания в воде тяжелых металлов (ИЗВ_{тм}) по формуле [9]

$$\text{ИЗВ}_{\text{тм}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i},$$

где C_i – фактическая концентрация i -го металла-загрязнителя; ПДК_i – предельно допустимая концентрация i -го металла-загрязнителя; n – количество приоритетных металлов-загрязнителей. В качестве ПДК использовались ПДК_{рх}, а при отсутствии этого показателя для какого-то элемента – ПДК_{хп} или ПДК_{гл}.

Параметр n в формуле должен быть не более 6 и обычно принимается равным 4–6. В настоящей работе $n = 6$.

⁸⁾ СанПиН 1.2.3.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 года).

⁹⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : Приказ Росрыболовства от 26.05.2025 № 296.

¹⁰⁾ Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001. Lelystad, Netherland, 2002. 76 p. URL: <https://edepot.wur.nl/674312> (date of access: 28.02.2026).

¹¹⁾ Временные методические рекомендации по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. Москва : Госкомгидромет СССР, 1986. 8 с.

Таблица 1. ПДК некоторых элементов в поверхностных водах по различным нормативным документам

Table 1. Maximum permissible concentration (MPC) of some elements in surface waters as per

Элемент / Element	ПДК _{хп} , мкг·л ⁻¹ / MPC _{DD} , μg·L ⁻¹	ПДК _{рх} , мкг·л ⁻¹ / MPC _{fish} , μg·L ⁻¹	ПДК _{гл} , мкг·л ⁻¹ / MPC _{DS} , μg·L ⁻¹	ПДК _{общ} , мкг·л ⁻¹ / MPC _{tot} , μg·L ⁻¹
Pb	10	6	11	220
Cu	1000	1	1.5	3.8
Zn	5000	10	9.4	40
Ni	20	10	5.1	6.3
Co	100	10	2.8	3.1
V	100	1	4.3	5.1
As	10	50	25	32
Ag	50	–	0.08	–
Mo	70	1	290	300
Cd	1	5	0.4	2
Se	10	2	5.3	5.4
Sb	5	–	6.5	7.2
Fe	300	100	–	–
Be	0.2	0.3	0.2	0.2
Tl	0.1	–	1.6	1.7

Примечание: ПДК_{хп} – предельно допустимая концентрация элемента в воде поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования; ПДК_{рх} – ПДК элемента в водоемах рыбохозяйственного значения; ПДК_{гл} – ПДК, представленные в «Голландских листах»; ПДК_{общ} – общие ПДК элементов.

Note: MPC_{DD} – maximum permissible concentration of the element in water of surface water bodies for domestic and drinking water use; MPC_{fish} – MPC of the element in fisheries; MPC_{DS} – MPCs from Dutch standards; MPC_{tot} – total MPCs of elements.

Классификацию качества воды проводили согласно шкале¹¹⁾, где полученным значениям ИЗВ соответствуют следующие классы:

- менее или равно 0.3 – очень чистая вода, класс I;
- более 0.3 до 1.0 – чистая вода, класс II;
- более 1.0 до 2.5 – умеренно загрязненная вода, класс III;
- более 2.5 до 4.0 – загрязненная вода, класс IV;
- более 4.0 до 6.0 – грязная вода, класс V;
- более 6.0 до 10.0 – очень грязная вода, класс VI;
- более 10.0 – чрезвычайно грязная вода, класс VII.

Результаты и обсуждение

Изменение содержания микроэлементов в речной воде в паводковый период связано прежде всего с ростом концентрации взвешенного вещества, которая может многократно повышаться по сравнению с меженью. Эти изменения видны невооруженным глазом – вода в реках становится мутной, а прозрачность резко снижается (рис. 2).

Состав и количество взвешенного вещества может очень различаться в разных реках или в разные периоды в одной и той же реке. В паводковый период в горных реках, характеризующихся большой скоростью течения, взвешенное вещество представлено преимущественно литогенной взвесью вследствие поступления терригенного стока, размывания затопленной береговой линии и взмучивания (ресуспензирования) донных отложений.

Анализ натуральных наблюдений и результаты измерения показали, что в сухой период (июль 2024 г.) концентрации общего взвешенного вещества в воде р. Кача, Бельбек и Черная были низкими и находились в пределах 2.5–3.2 мг·л⁻¹ (рис. 3). На фотографиях (см. рис. 2, *справа*) видно, что вода в реках была прозрачной. В паводковый период в р. Черной концентрация взвешенного вещества увеличилась в 2.5 раза, в то время как в р. Кача и Бельбек этот показатель вырос более чем в 100 раз (рис. 3).

Взвешенное вещество в речной воде может быть как источником микроэлементов, которые в процессе выщелачивания из частиц взвеси могут переходить в растворенные формы, так и сорбентом растворенных микроэлементов из воды. Разные микроэлементы могут по-разному себя вести в отношении взвешенного вещества. Таким образом происходят сложные процессы перераспределения микроэлементов в воде между растворенными формами и формами, связанными со взвешенным веществом [10].

Согласно полученным данным, наблюдаемые концентрации всех нормируемых микроэлементов в речной воде не превышали ПДК_{хл}. Сравнение результатов с нормативными значениями концентраций в воде водных объектов рыбохозяйственного значения выявило ряд превышений. Концентрации растворенной меди (1.06–1.83 мкг·л⁻¹ при ПДК_{рх} = 1 мкг·л⁻¹) превышали норматив во всех пробах воды рек в оба сезона, кроме летней пробы из р. Черной. Концентрации растворенного цинка (21.84–66.36 мкг·л⁻¹ при ПДК_{рх} = 10 мкг·л⁻¹) были выше ПДК во время весеннего пробоотбора во всех реках и летом в р. Каче (рис. 4).

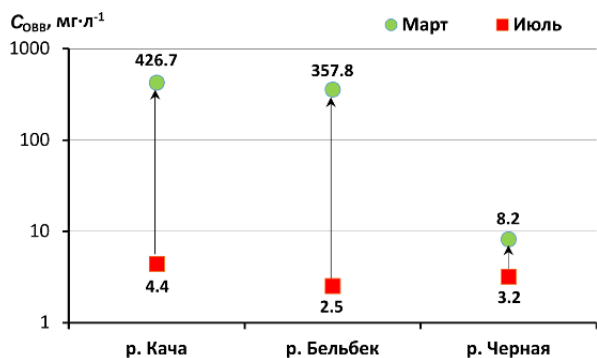
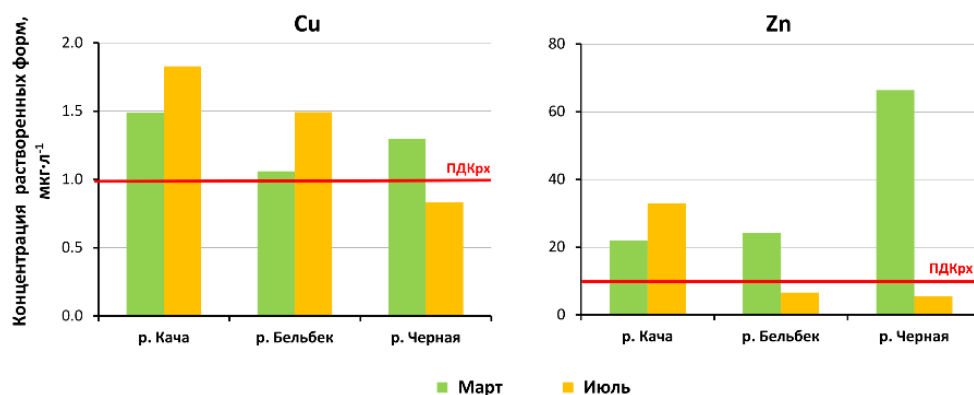


Рис. 3. Концентрация общего взвешенного вещества ($C_{ОВВ}$) в р. Кача, Бельбек и Черная в марте (паводок) и июле (межень) 2024 г.

Fig. 3. Concentration of total suspended matter ($C_{ОВВ}$) in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers in March (flood) and July (low water) 2024



Р и с . 4. Концентрации растворенных меди (слева) и цинка (справа) в водах р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый (март) и сухой (июль) периоды 2024 г.

Fig. 4. Concentration of dissolved copper (left) and zinc (right) in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March) and low water (July) periods of 2024

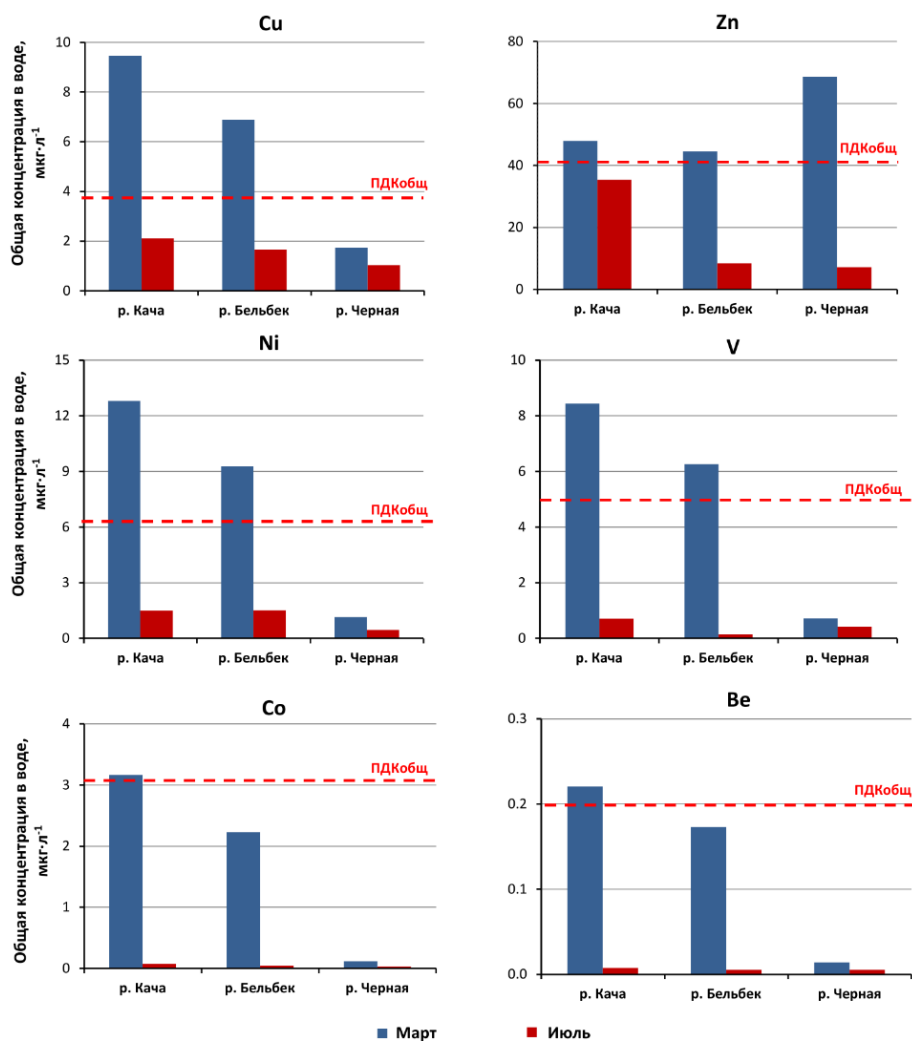
Анализ общих концентраций микроэлементов показал, что в воде р. Кача и Бельбек в паводковый период зафиксированы превышения ПДК_{общ} для никеля (12.79 и 9.27 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ при ПДК_{общ} = 6.3 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$), меди (9.45 и 6.88 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ при ПДК_{общ} = 3.8 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$), цинка (47.93 и 44.44 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ при ПДК_{общ} = 40 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) и ванадия (8.43 и 6.25 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ при ПДК_{общ} = 5.1 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$), а в р. Каче – еще для кобальта (3.17 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ при ПДК_{общ} = 3.1 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) и бериллия (0.22 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ при ПДК_{общ} = 0.2 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) (рис. 5). В р. Черной обнаружено превышение ПДК_{общ} только для цинка (68.64 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ при ПДК_{общ} = 40 $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) в весенний сезон.

Концентрации других исследуемых элементов не превышали установленных нормативов и в большинстве случаев составляли менее 20 % от соответствующих ПДК (рис. 6).

Следует отметить, что при анализе общих концентраций микроэлементов в воде было зафиксировано большее количество критических элементов, концентрация которых превышала ПДК, чем при анализе концентраций растворенных форм. Это свидетельствует о том, что микроэлементы, связанные со взвешенным веществом, оказывают значительное влияние на качество вод в реках, а следовательно, на благополучие обитающих в них гидробионтов и на безопасность использования речной воды населением в хозяйственных целях.

Для оценки качества вод в отношении тяжелых металлов и других микроэлементов были рассчитаны индексы загрязненности вод (ИЗВ_{ТМ}) для растворенных форм и общих концентраций в воде (табл. 2). В расчет включены шесть элементов, концентрации которых превысили ПДК хотя бы в одном случае, – это цинк, медь, кобальт, никель, ванадий и бериллий.

Анализ результатов показал, что при оценке по растворенной форме микроэлементов в р. Кача и Бельбек в паводковый период не наблюдалось ухудшения качества воды – она была чистая (класс II). В р. Черной результат

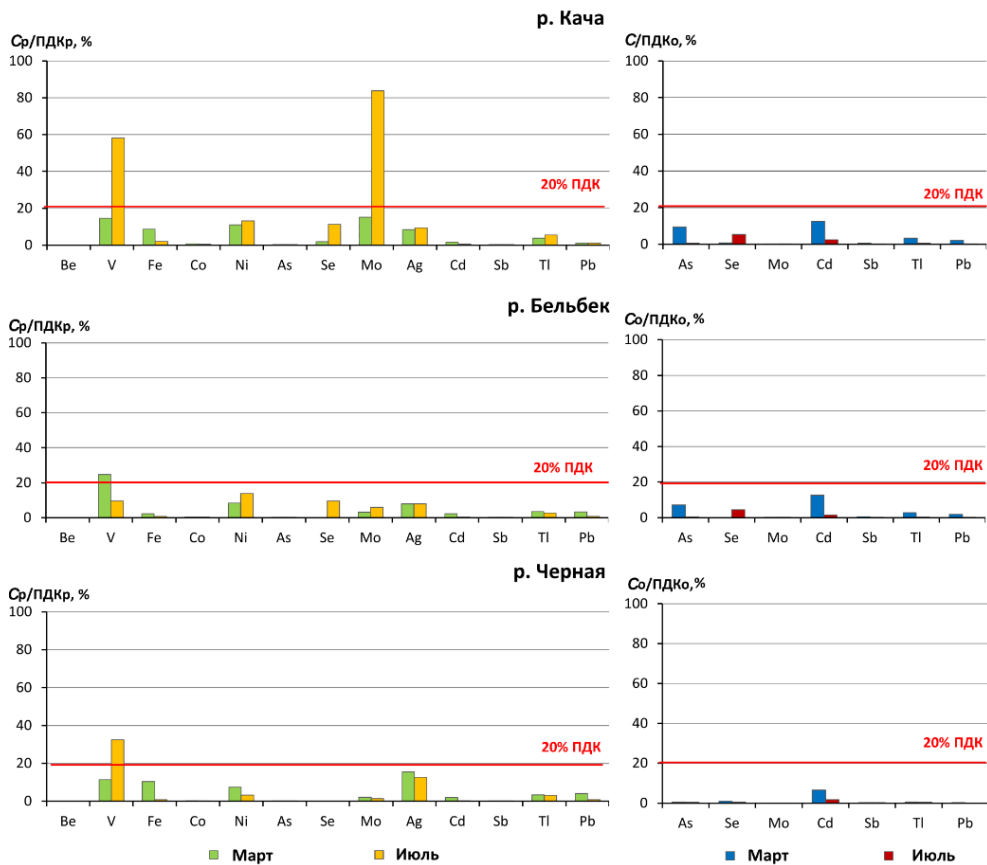


Р и с . 5 . Общие концентрации микроэлементов в водах р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый (март) и сухой (июль) периоды 2024 г.

Fig. 5. Total concentrations of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March) and low water (July) periods of 2024

иной: в паводковый период качество воды в отношении растворенных форм металлов ухудшилось до класса III (умеренно загрязненная) против класса I (очень чистая) в сухой период. Такой результат объясняется аномально высокой концентрацией растворенного цинка, которая в 6.6 раз превысила ПДК_{рх} в паводковый период.

ИЗВ_{ТМ}, рассчитанные по общим концентрациям металлов в воде, однозначно определяют более низкое качество речных вод в паводковый период по сравнению с сухим периодом. В р. Кача и Бельбек качество воды в паводковый период определялось как «умеренно загрязненная» (класс III), а в р. Черной – «чистая» (класс II). В сухой период качество воды во всех исследуемых



Р и с . 6 . Относительные концентрации растворенных форм ($Sr/ПДКр$) и относительные общие концентрации ($Co/ПДКо$) микроэлементов в водах р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый (март) и сухой (июль) периоды 2024 г.

Fig . 6 . Relative concentrations of dissolved forms ($Sr/ПДКр$) and relative total concentrations ($Co/ПДКо$) of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March) and low water (July) periods of 2024

реках определено, как «очень чистая вода» (класс I). При этом полученные значения $ИЗВ_{ТМ}$ коррелируют с концентрацией взвешенного вещества в реках.

Проведенная оценка качества вод изучаемых рек показывает, что целесообразно исследовать не только концентрации растворенных форм микроэлементов, но и их общее содержание в воде.

Седиментационные процессы в водных экосистемах играют важную роль в самоочищении водной среды от загрязнителей и обеспечении качества воды [11, 12]. Поэтому при оценке экологического состояния водных экосистем важно изучать аккумуляционные свойства взвешенного вещества в отношении загрязнителей различной природы. В воде р. Кача, Бельбек и Черная, кроме количества общего взвешенного вещества и концентрации микроэлементов, связанных со взвешенным веществом, был оценен вклад взвешенных

Т а б л и ц а 2. Оценка качества воды в реках Кача, Бельбек и Черная в отношении микроэлементов в паводковый (март) и сухой (июль) периоды

Table 2. Water quality assessment in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers in relation to trace elements during flood (March) and low water (July) periods of 2024

Критерий оценки / Assessment criterion	р. Кача / Kacha River		р. Бельбек / Belbek River		р. Черная / Chernaya River	
	Март / March	Июль / July	Март / March	Июль / July	Март / March	Июль / July
<i>Растворенная форма / Dissovled form</i>						
ИЗВ _{ТМ} / IWP _{НМ}	0.7	1.0	0.6	0.4	1.4	0.3
Класс качества вод / Water quality class	II	II	II	II	III	I
<i>Общее содержание / Total content</i>						
ИЗВ _{ТМ} / IWP _{НМ}	1.6	0.3	1.2	0.2	0.4	0.1
Класс качества вод / Water quality class	III	I	III	I	II	I

Примечание: ИЗВ_{ТМ} – индекс загрязненности вод тяжелыми металлами.

Note: IWP_{НМ} – water pollution index with heavy metals.

форм элементов в общее их содержание в воде, а также рассчитаны коэффициенты накопления для оценки аккумуляционных свойств взвеси в отношении 15 микроэлементов, включая тяжелые металлы.

Соотношения растворенных и взвешенных форм микроэлементов в р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый и сухой периоды представлены на рис. 7 и 8 соответственно. Анализ результатов показал, что эти соотношения имеют лишь небольшие различия в разных исследуемых реках в пределах одного периода исследований и описывают общие тенденции перераспределения микроэлементов между их растворенными формами и формами, связанными со взвешенным веществом [13, 14].

В паводковый период для большинства элементов характерно преобладание взвешенных форм (рис. 7). Исключениями являются цинк, молибден, кадмий и серебро, у которых соотношение форм ближе к средним значениям. Несколько иные результаты получены в паводковый период в р. Черной – здесь у половины элементов доминировали растворенные формы. Это, вероятно, связано с тем, что количество и состав (соотношение литогенной и биогенной составляющих) взвешенного вещества в р. Черной и в р. Кача и Бельбек существенно различаются.

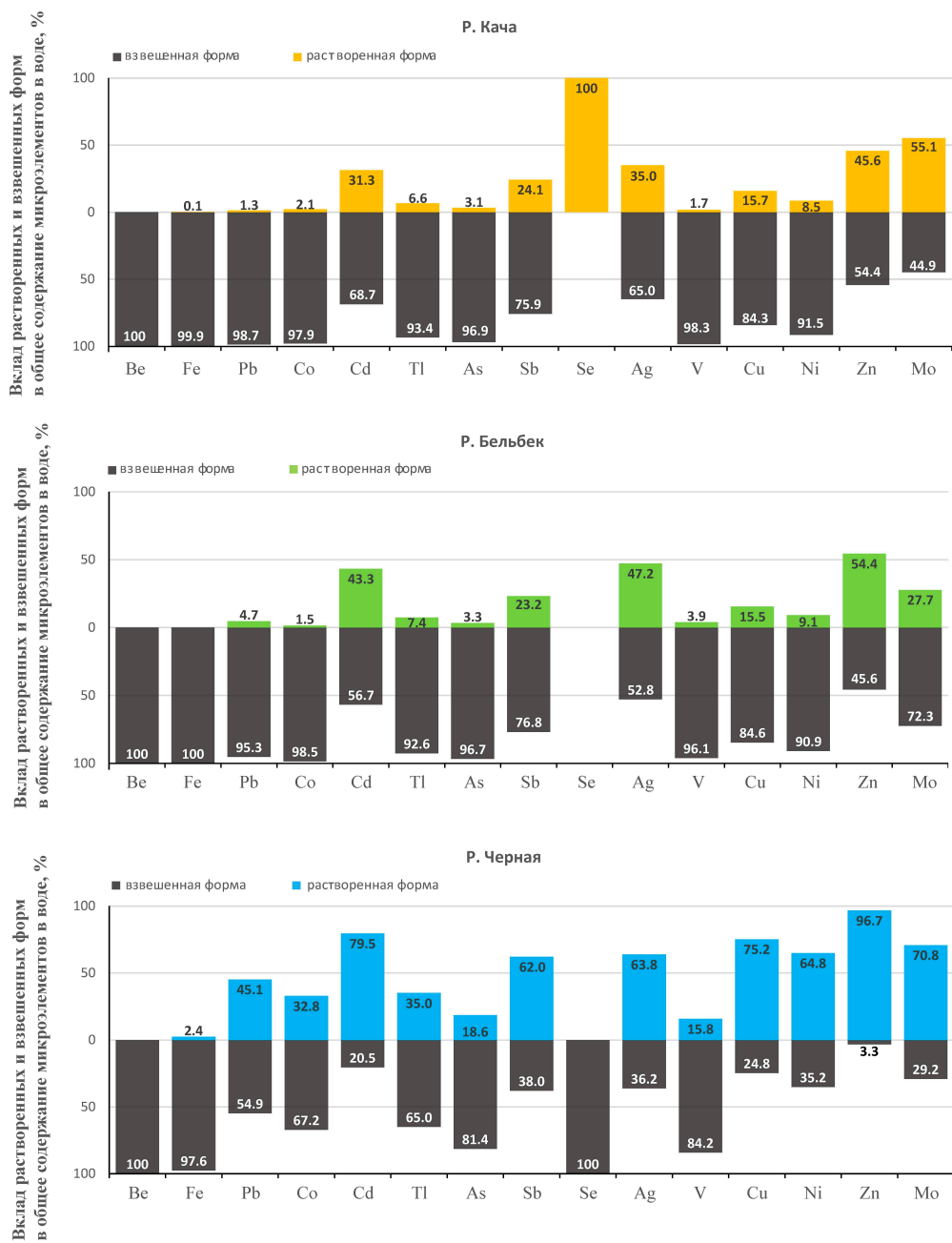
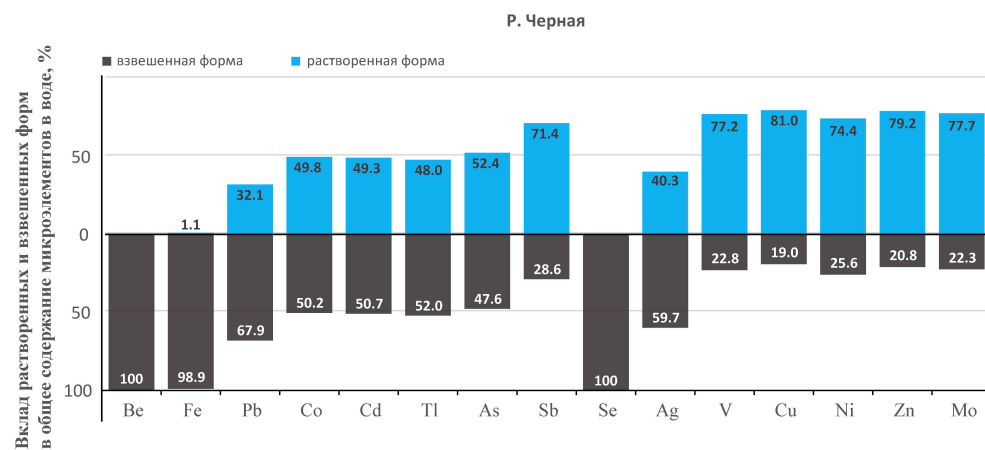
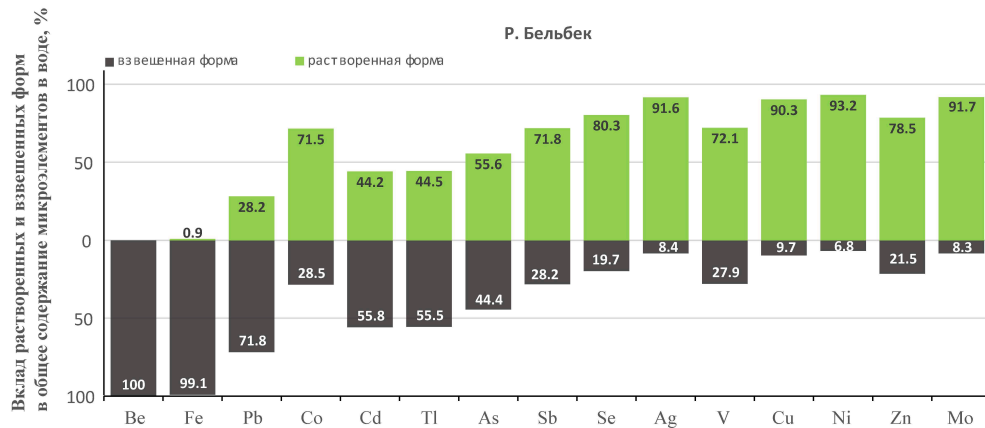
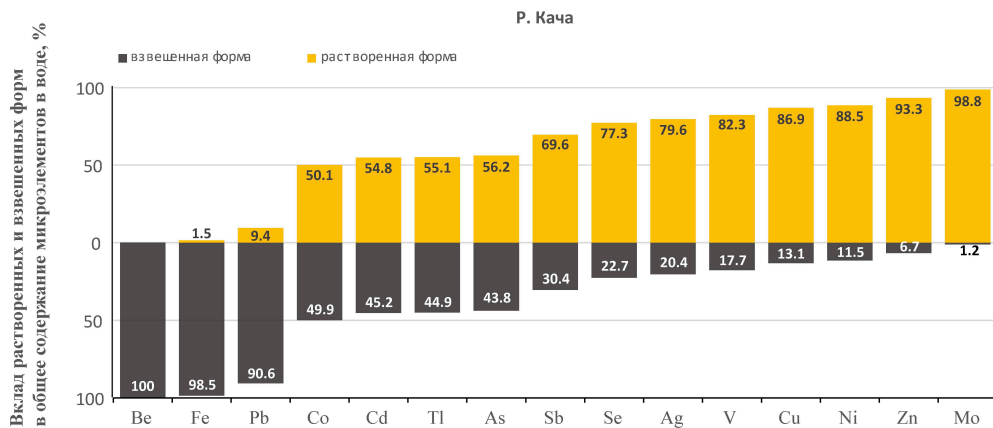


Рис. 7. Вклад растворенных и взвешенных форм в общее содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная в паводковый период (март 2024 г.)

Fig. 7. Contribution of dissolved and suspended forms to the total content of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March 2024)



Р и с . 8. Вклад растворенных и взвешенных форм в общее содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная в сухой период (июль 2024 г.)
 Fig . 8. Contribution of dissolved and suspended forms to the total content of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during low water (July 2024)

В сухой период преобладание растворенных форм характерно для большей части микроэлементов, а само распределение мало различается для разных рек (рис. 8). В этот период железо, бериллий и свинец находятся преимущественно во взвешенной форме. Для кобальта, мышьяка, кадмия и таллия распределение между растворенными и взвешенными формами примерно равно.

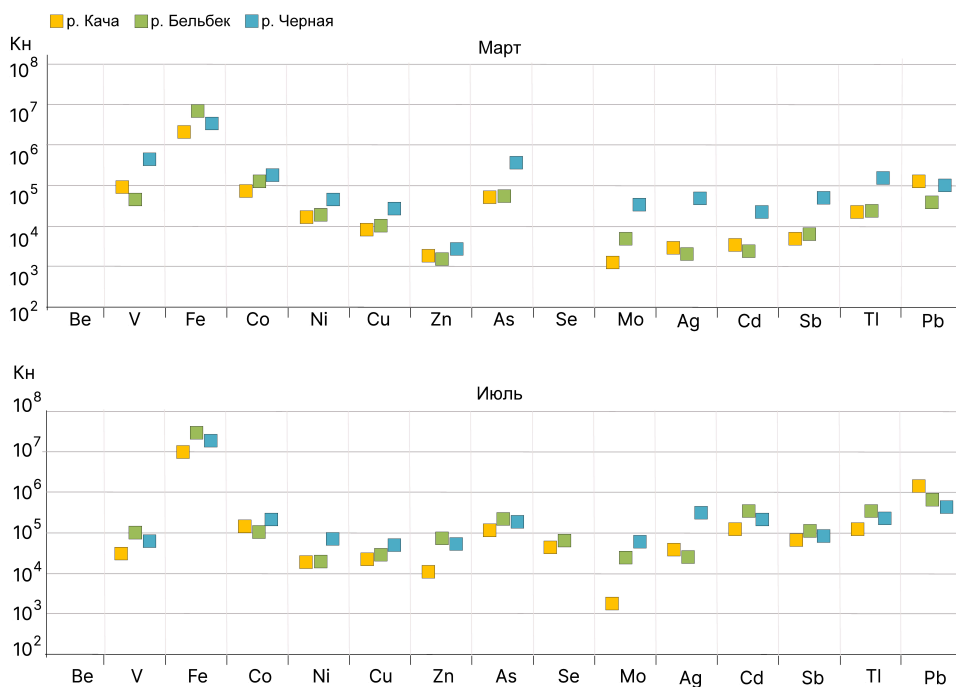
Количественная оценка аккумулирующей способности взвешенного вещества в отношении микроэлементов проводилась путем расчетов коэффициента накопления (K_n), который показывает отношение концентрации элемента во взвеси к его концентрации в растворенной форме.

Большие значения коэффициента накопления взвешенным веществом большинства микроэлементов указывают на его высокую аккумуляционную емкость, а следовательно, и весомую роль в перераспределении веществ, поступающих в речные экосистемы [10].

С одной стороны, взвешенное вещество способствует быстрому выведению загрязнителей из водной среды в результате процесса седиментации. С другой стороны, в ходе гидродинамических процессов загрязнители, связанные со взвесью, могут переноситься в другие участки реки, а также выноситься с водным потоком за пределы речной экосистемы. Как уже отмечалось ранее, взмучивание донных осадков может приводить к десорбции веществ с частичек донных отложений, что приводит к вторичному загрязнению речных вод. Эффективность всех этих процессов в отношении конкретного элемента зависит в значительной степени от способности взвешенного вещества аккумулировать данный элемент [10, 14].

Как свидетельствуют данные, приведенные на рис. 9, значения K_n для разных элементов различались на четыре порядка. Самые низкие значения K_n ($n \cdot 10^3$) были отмечены для цинка, молибдена, серебра, кадмия и сурьмы в паводковый период в р. Кача и Бельбек. В р. Черной K_n этих элементов были на порядок выше, что указывает на иной состав взвеси в этой реке в паводковый период. Самые высокие значения K_n ($n \cdot 10^6 - n \cdot 10^7$) получены для железа в оба сезона и для свинца в сухой сезон. Соответственно, будут формироваться самые маленькие и самые большие потоки переноса этих элементов со взвешенным веществом [8]. Для остальных микроэлементов (ванадия, кобальта, никеля, меди, мышьяка и таллия) коэффициенты накопления K_n находились в диапазоне $n \cdot 10^4 - n \cdot 10^5$.

В целом для всех рек можно отметить близкие значения K_n элементов во взвешенном веществе речной воды как для паводкового периода, так и для сухого сезона. Изученные элементы можно выстроить в ряд по мере убывания K_n : Fe > Co > V > Pb > As > Tl > Ni > Cu > Sb > Mo > Ag > Cd > Zn – в паводковый период; Fe > Pb > Cd > Tl > As > Co > Sb > V > Zn > Se > Cu > Ag > Ni > Mo – в сухой период. Коэффициенты накопления взвешенным веществом бериллия не удалось оценить из-за его низких, не детектируемых растворенных концентраций в воде.



Р и с . 9 . Коэффициенты накопления микроэлементов взвешенным веществом в р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый (март) и сухой (июль) периоды 2024 г.

F i g . 9 . Suspended matter concentration factors of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March) and low water (July) periods of 2024

Заклучение

Высокий интерес к исследованиям загрязненности компонентов экосистем севастопольских рек Кача, Бельбек и Черная обусловлен тем, что эти реки являются основными источниками пресной воды в регионе и используются для питьевого водоснабжения Севастополя. При анализе качества речной воды, проводимом Росгидрометом, определяются только растворенные формы микроэлементов, без учета тех, что связаны со взвешенным веществом.

При оценке качества воды по растворенным формам превышения ПДК_{рх} зафиксированы только для меди (во всех пробах, кроме летней в р. Черной) и цинка (во всех реках весной и в р. Каче летом). Анализ общих концентраций микроэлементов в воде выявил большее количество загрязнителей в паводок: в р. Кача и Бельбек отмечены превышения ПДК_{общ} меди, цинка, никеля, ванадия, а также бериллия и кобальта (только в р. Каче).

Оценка качества воды по ИЗВ в отношении исследуемых микроэлементов, выполненная с учетом их общих концентраций в воде, показала ухудшение качества воды в реках в паводковый период на 1–2 класса – с очень чистой воды (класс I) до чистой (класс II) (в р. Черной) и умеренно загрязненной

(класс III) (в р. Кача и Бельбек). Это свидетельствует о том, что микроэлементы, связанные со взвешенным веществом, оказывают большое влияние на качество вод в реках (особенно в паводковый период), а следовательно, на благополучие обитающих в них гидробионтов и на безопасность использования речной воды населением в хозяйственных целях.

Анализ распределения микроэлементов в системе вода – взвешенное вещество показал, что взвешенное вещество играет важную роль в самоочищении речных экосистем от микроэлементов, включая ряд тяжелых металлов и металлоидов. Значения коэффициентов накопления элементов взвешенным веществом K_n для разных элементов варьировали на четыре порядка от $n \cdot 10^3$ (цинк, молибден, серебро, кадмий и сурьма) до $n \cdot 10^7$ (железо, свинец). Это указывает на высокую аккумуляционную способность взвеси, а значит, и ее существенную роль в перераспределении микроэлементов, поступающих в речные экосистемы.

Установлено, что паводковый период значительно влияет на содержание микроэлементов в речной воде, особенно в р. Кача и Бельбек, где концентрация общего взвешенного вещества существенно увеличивается, а некоторая часть микроэлементов, связанных со взвешенным веществом, может переходить в растворенную форму. В данный период для безопасного использования речной воды в хозяйственных целях необходимо ее предварительно фильтровать или отстаивать. Кроме того, целесообразно проводить мониторинг содержания меди и цинка как критических элементов во всех исследуемых реках независимо от сезона.

Полученные результаты можно использовать при разработке мер по предотвращению химического загрязнения речных вод, используемых в качестве основного источника водоснабжения населения, с учетом ухудшения качества вод в паводковый период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегтерев А. Х. Заполняемость водохранилищ Крыма в период перекрытия Северо-Крымского канала. Севастополь : СевГУ, 2022. 70 с. EDN RJSBVI.
2. Куксина Л. В., Голосов В. Н., Жданова Е. Ю., Цыпленков А. С. Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в горном Крыму // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 5. С. 36–50. EDN OTDGSE.
3. Николенко И. В., Копачевский А. М., Каримов Э. А. Анализ наполнения водохранилищ естественного стока для обоснования путей решения проблем обеспечения водной безопасности республики Крым и города Севастополя // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 4. С. 407–422. EDN EPTKJS. <https://doi.org/10.31857/S0321059622040150>
4. Истомина М. Н., Кочарян А. Г., Лебедева И. П., Никитская К. Е. Экологические последствия наводнений // Инженерная экология. 2004. № 4. С. 3–19. EDN GFTTTF.
5. Демидов В. В., Мушаева Т. И. Влияние эрозионных процессов в период весеннего снеготаяния на химический состав вод речного стока // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2014. № 10. С. 71–76. EDN RZJQMF.

6. *Мушаева Т. И., Демидов В. В.* Закономерности формирования поверхностного стока и смыва почвы в период весеннего снеготаяния на территории агроландшафта и их влияние на качество речных вод // Живые и биокосные системы. 2015. № 11. 9. EDN UYNLLZ.
7. *Кржиж Л., Виттлингерова З., Паиковский И. С., Халоупка Д.* Влияние паводковых ситуаций на качество воды в подземных источниках водоснабжения // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2006. № 5. С. 440-445. EDN HVNYHH.
8. *Малахова Л. В., Проскурнин В. Ю., Егоров В. Н., Чужикова-Проскурнина О. Д. и др.* Микроэлементы в воде реки Черной и оценка их поступления с речным потоком в Севастопольскую бухту в зимний сезон 2020 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 77–94. EDN FECQCM. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-77-94>
9. *Чужикова-Проскурнина О. Д., Проскурнин В. Ю., Терещенко Н. Н., Кобечинская В. Г.* Тяжелые металлы в прибрежных водах российского сектора Черного и Азовского морей // Экосистемы. 2022. № 31. С. 111–122. EDN VUBCIT.
10. *Егоров В. Н.* Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2019. 356 с. EDN HNMPDC. <https://doi.org/10.21072/978-5-6042938-5-0>
11. *Егоров В. Н., Гулин С. Б., Малахова Л. В., Мирзоева Н. Ю. и др.* Нормирование качества вод Севастопольской бухты по потокам депонирования загрязняющих веществ в донные отложения // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 188–195. EDN VZHWGD. <https://doi.org/10.7868/S0321059618020086>
12. *Егоров В. Н., Гулин С. Б., Малахова Л. В., Мирзоева Н. Ю. и др.* Биогеохимические характеристики седиментационного самоочищения Севастопольской бухты от радионуклидов, ртути и хлорорганических загрязнителей // Морской биологический журнал. 2018. Т. 3, № 2. С. 40–52. EDN XSWAXJ. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.2.03>
13. *Савенко В. С.* Химический состав взвешенных наносов рек мира. Москва : ГЕОС, 2006. 175 с. EDN QKGFWZ.
14. *Гордеев В. В.* Особенности геохимии речного стока в Черное море // Система Черного моря. Москва : Научный мир, 2018. С. 247–286. EDN TUAIOG.

Поступила 26.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 06.08.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах:

Чужикова Ольга Дмитриевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-4518-2624**, **Scopus AuthorID: 57205198922**, **ResearcherID: X-4583-2019**, **SPIN-код: 2088-6728**, chuzhikova@ibss-ras.ru

Проскурнин Владислав Юрьевич, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-2176-9228**, **Scopus Author ID: 55653290000**, **ResearcherID: H-4611-2018**, **SPIN-код: 5130-1015**, v_proskurnin@ibss-ras.ru

Параскив Артём Алексеевич, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9874-5382**, **Scopus Author ID: 57205196196**, **ResearcherID: K-1314-2018**, **SPIN-код: 9644-6504**, *paraskiv@ibss-ras.ru*

Мирзоева Наталья Юрьевна, ведущий научный сотрудник, руководитель ОРХБ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8538-2436**, **Scopus Author ID: 55623414000**, **ResearcherID: Q-9393-2016**, **SPIN-код: 8874-6381**, *mirzoyevanyu@ibss-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Чужикова Ольга Дмитриевна – участие в экспедициях, подготовка проб и проведение химического анализа для определения концентраций микроэлементов, аналитическая обработка данных, написание рукописи, оформление статьи

Проскурнин Владислав Юрьевич – участие в экспедициях, выполнение химического анализа и измерение концентраций по определению микроэлементов, аналитическая обработка данных, редактирование статьи

Параскив Артём Алексеевич – участие в экспедициях, отбор и подготовка проб, участие в химическом анализе для определения концентраций микроэлементов, редактирование статьи

Мирзоева Наталья Юрьевна – постановка цели, задач, анализ полученных результатов, обсуждение результатов, редактирование статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.