

НАКОПЛЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РЕК КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА



¹Н.Г. Максимович, ¹В.Т. Хмурчик, ¹О.А. Березина,
¹А.Д. Деменев, ¹А.В. Татаркин

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет

Выполнены исследования накопления бериллия в донных отложениях р. Косье (Западный Урал, РФ), в которую поступают кислые воды 8 изливов, характеризующиеся сульфатным железисто-кальциевым составом, высокой минерализацией и значительным содержанием бериллия. Сделан вывод, что в качестве сорбционного барьера для бериллия выступает речная взвесь коллоидного размера, переносимая с потоком воды и постепенно осаживаемая на дне. Отмечено, что агрегация частиц между собой с образованием взвеси более крупного размера приводит к тому, что по мере удаления от источника загрязнения наблюдается постепенный рост содержания бериллия в грубодисперсной водной взвеси при снижении общего содержания бериллия в воде. Рекомендовано выявленные особенности миграции и аккумуляции бериллия учитывать при разработке природоохранных мероприятий по экологической реабилитации р. Косья.

Ключевые слова: кислые шахтные воды, Кизеловский угольный бассейн, бериллий, техногенные донные отложения, речные системы, седиментация, техногенные источники загрязнения

Статья поступила в редакцию 23.05.2023, доработана 22.08.2023, принята к публикации 25.10.2023

Accumulation of Beryllium in Bottom Sediments of Rivers in the Kizelovsky Coal Basin

¹N.G. Maximovich, ¹V.T. Khmurchik, ¹O.A. Berezina, ¹A.D. Demenev, ¹A.V. Tatarkin

¹Perm State National Research University, 614067 Perm, Russia

The studies have been carried out on the accumulation of beryllium in bottom sediments of the river. Kosva (Western Urals, RF), which receives acidic waters from 8 water outflows, characterized by a sulfate iron-calcium composition, high mineralization and a significant beryllium content. It is concluded that a river suspension of colloidal size acts as a sorption barrier for beryllium, transported with the flow of water and gradually settling at the bottom. It is noted that the aggregation of particles among themselves with the formation of a larger suspension leads to the fact that, with distance from the source of pollution, a gradual increase in the beryllium content in coarse water suspension is observed with a decrease in the total beryllium content in water. It is recommended that the identified features of beryllium migration and accumulation be taken into account when developing environmental protection measures for the ecological rehabilitation of the river Kosvy.

Keywords: acidic mine waters, Kizelovsky coal basin, beryllium, technogenic bottom sediments, river systems, sedimentation, technogenic sources of pollution

Received 23.05.2023, revised 22.08.2023, accepted for publication 25.10.2023

DOI: 10.18412/1816-0395-2024-3-66-71

Бериллий (Be) является естественным компонентом земной коры и встречается в природе повсеместно. По данным А.П. Виноградова, кларк этого элемента в земной коре составляет $3,8 \times 10^{-4}$ %. В естественных природных условиях повышенные концентрации обычно приурочены к кислым магматическим породам, в которых содержание Be составляет 2,0–10,0 мг/кг. В геохимических процессах в земной коре он ведет себя как типичный литофильный элемент. По резуль-

татам исследований В.Р. Клера, Л.Я. Кизилштейна др. в природных условиях известно более 40 минералов, содержащих Be, большинство из которых относится к редким [1, 2]. В условиях гипергенеза они очень устойчивы к выветриванию и поэтому не играют большой роли в качестве источника Be в процессе осадконакопления. В бассейны седиментации Be поступает за счет разрушения главных породобразующих минералов, содержание элемента в которых находится на уровне кларка [2].

Коллоиды хорошо сорбируют Be, что предопределяет его концентрирование на сорбционных барьерах и преимущественное накопление в органической части углей благодаря его склонности к связыванию органическим веществом. Кларк Be в каменных углях составляет 1,9 мг/кг, а в бурых углях — 1,2 мг/кг. При этом выделяют угли с повышенным средним содержанием Be [3].

Среднее содержание Be в углях бывшего СССР составляет 1,4–5,6 мг/кг, содержание бе-

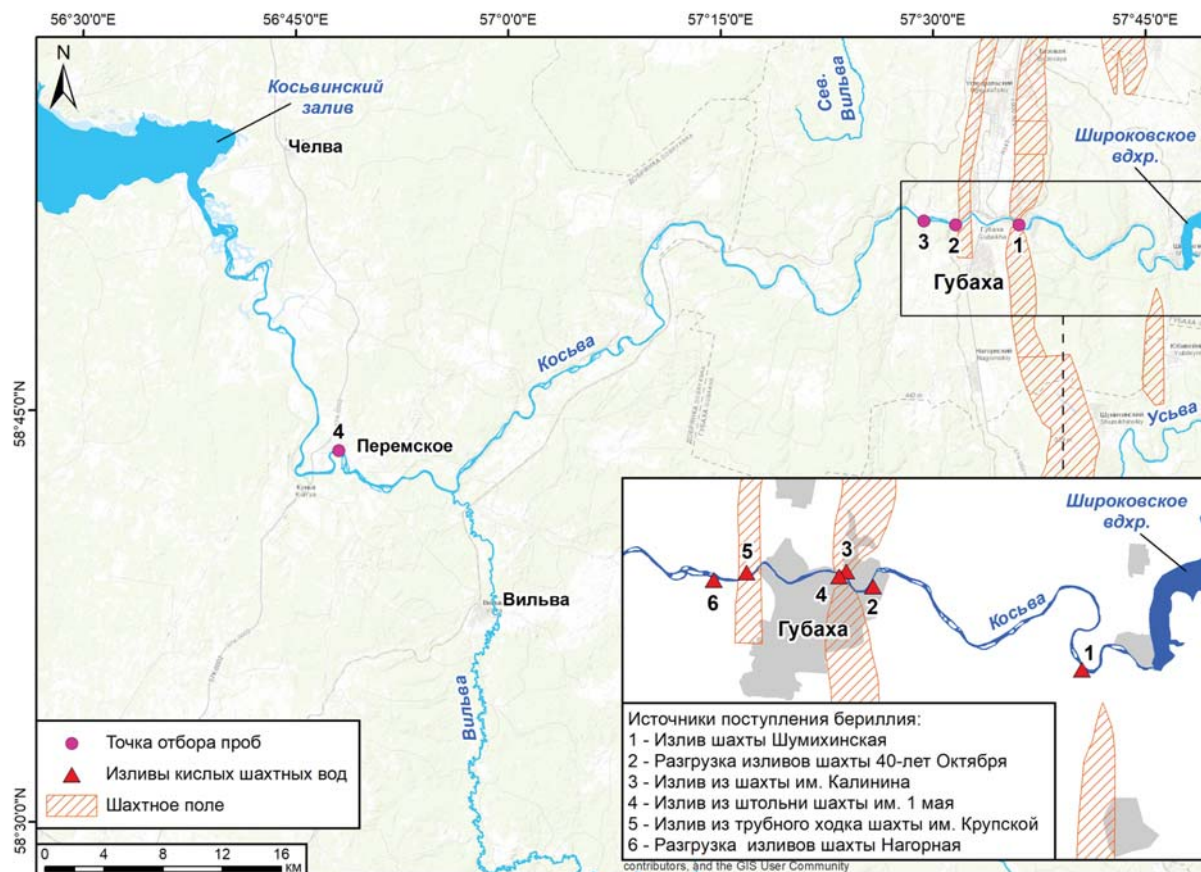


Рис. 1. Источники загрязнения (I–VI) р. Косьвы и местоположение точек отбора проб (1–4)

Fig. 1. Sources of pollution (I–VI) of Kosva river, and location of the sampling points (1–4)

риллия в шламах обогащения класса 13–100 мм угольных обогатительных фабрик Кузбасса — 2,13 мг/кг, а в угле обогащения класса 0,01–0,2 мм — 1,28 мг/кг в пересчете на воздушно-сухое состояние [4].

Содержание Ве в углях Кизеловского угольного бассейна (КУБ) — 3,9 мг/кг — самое большое для Уральского региона. В связи с этим угледобыча и углереработка являются важнейшими источниками загрязнения окружающей среды бериллием. Длительная разработка угольных месторождений приводит к нарушению равновесного состояния в системе "вода — порода", существовавшего до начала эксплуатации месторождения, и активизации химического выветривания пород, что приводит к увеличению как общей минерализации вод, так и содержания Ве в них [5]. Кислые воды в присутствии сульфат-ионов и органического вещества способны переносить значительные количества элемента в форме комплексов, так что содержание Ве в водах может достигать сотен

микрограммов на литр [3]. В последние десятилетия о Ве все чаще говорят как об опасном загрязнителе окружающей среды. Содержание Ве в подземных водах КУБ составляет от 3,5 до более 100 ПДК [6].

Бериллий относится к I классу экологической опасности [7]. Он является одним из высокотоксичных химических элементов, который относят к ядам с олигодинамическим типом действия, для которых характерно отсутствие корреляции между дозой действующего вещества и ответной реакцией организма. Развивающееся в результате воздействия Ве и его соединений заболевание получило название бериллиоз. При нем изменяется иммунобиологическое состояние организма и активность многих ферментов, нарушается белковый обмен, а также наблюдается дисбаланс микроэлементов. Бериллиевая интоксикация имеет и канцерогенный эффект. При этом опасны не только растворимые соединения Ве, которые токсичнее его нерастворимых соединений, но и высокодис-

персная пыль или дым, содержащие этот химический элемент. При вдыхании высокодисперсных частиц с высоким содержанием Ве он накапливается в скелете, а также в печени и легких, откуда не выводится долгие годы [8]. Предельно допустимая концентрация (ПДК_{рх}) для содержания Ве в водных объектах рыбохозяйственного значения составляет 0,0003 мг/дм³ (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552), для остальных компонентов окружающей среды ПДК не разработаны.

Природные подземные воды на территории КУБ характеризуются высоким окислительным потенциалом, гидрокарбонатно-кальциевым составом с общей минерализацией до 1,5 г/л и нейтральной реакцией среды [9]. При взаимодействии их с углем и горными породами, богатыми сульфидной и органической серой, воды преобразуются в кислые сульфатные железо-алюминиевые натриево-кальциевые с минерализацией до 35 г/л [10]. При этом в них наблюдаются повышенные концентрации Ве и



Рис. 2. Техногенный осадок в руслах рек на территории КУБ

Fig. 2. Technogenic sediment in river beds on the territory of KUB

других химических элементов. Образовавшиеся кислые шахтные воды при выходе на дневную поверхность загрязняют почвенный покров и поверхностные водотоки. Поступление Ve в поверхностную гидросферу КУБ не ограничивается разливами кислых шахтных вод. Стоки с породных отвалов и разгрузка загрязненных подземных вод в виде родников, а также размыв отвалов в прибрежной зоне являются источниками поступления Ve в водные объекты, но в значительно меньших масштабах — менее 5 %.

Задача исследования — определение форм миграции и накопления Ve в воде и донных отложениях рек, подвергающихся воздействию кислых шахтных вод. Исследования выполнены на примере р. Косьвы.

Объект и методы исследования

Площадь КУБ (Западный Урал, Россия) составляет 200 км² и расположен он на востоке Пермского края. Добыча полезных ископаемых в КУБ велась с 1796 г. После прекращения добычи угля в конце XX в. шахты были затоплены, после восстановления уровня подземных вод сформировались разливы, которые попадают в водные объекты. Химический состав шахтных вод определяется литолого-геохимическими характеристиками угле-

носных образований. В углях КУБ обнаружено более 50 элементов в значимых количествах, у 12 из них концентрации в угле в 10–1000 раз выше, чем в угленосной толще [5].

Река Косьва является крупным левобережным притоком Камского водохранилища. Длина реки — 283 км, площадь водосбора 6300 км², уклон изменяется от 3 % в верховьях до 1,8 % в нижнем течении, коэффициент густоты речной сети около 0,21 км/км² [11]. Водный режим характеризуется ярко выраженным половодьем, в весенний период связанным с таянием снега на водосборе, и ежегодным затоплением поймы (770 га). На территории её водосбора на сегодняшний день известно несколько изливов кислых шахтных вод с опасным для окружающей среды химическим составом и значениями pH до 2,5, в том числе Ve — 0,04 мг/дм³ (табл. 1). При впадении изливов в речные воды происходит образование техногенного осадка, который мигрирует вниз по течению, накапливаясь на гидродинамических барьерах, в том числе в Косьвинском заливе (рис. 1). Во время высокой водности он частично откладывается в пойме и после высыхания с пылью мигрирует в атмосферу (рис. 2).

Бассейн р. Косьвы типичен для территории КУБ, поэтому он

был взят за образец для верификации алгоритмов исследования. Объектом исследования являлись донные отложения, содержащие техногенный осадок. В дальнейшем применявшиеся алгоритмы можно использовать для исследования других рек, испытывающих негативные влияния от ликвидированных шахт КУБ.

Определение форм переноса бериллия в водах реки. Формы переноса Be в речной сети определяли методом последовательного фильтрования проб речной воды через фильтры с размерами пор 2,5 и 0,45 мкм и последующего определения в получаемых фильтратах содержания элемента методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). В пластиковую емкость объемом 1,5 дм³ отбирали пробу воды с глубины 0,5 м от водной поверхности и в течение 24 ч транспортировали в лабораторию, сохраняя пробу на льду в сумке-холодильнике. В лаборатории часть пробы (0,1 дм³) готовили для анализа на общее содержание в ней бериллия, для чего ее фиксировали азотной кислотой. Оставшийся объем пробы фильтровали через бумажный фильтр с размером пор 2,5 мкм и передавали для анализа на содержание Be в мелкодисперсной и коллоидной водной взвеси и в водорастворимом виде. Оставшийся фильтрат про-

пускали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и передавали для анализа на содержание Be в коллоидной водной взвеси и в водорастворимом виде. Полученные фильтраты передавали на анализ после фиксации их азотной кислотой. В результате получили следующие данные по переносу Be в водах реки:

1) общее количество переносимого бериллия — в нефилтрованной пробе;

2) перенос частицами мелкодисперсной и коллоидной водной взвеси и в водорастворимом виде — после фильтрации через фильтр с размером пор 2,5 мкм;

3) перенос частицами коллоидного размера и в водорастворимом виде — после фильтрации через фильтр с размером пор 0,45 мкм.

По разнице содержания Be между данными по пп. 1 и 2 определяли количество бериллия, переносимого грубодисперсной водной взвесью, по разнице между данными по пп. 2 и 3 — переносимого мелкодисперсной водной взвесью.

Определение форм нахождения бериллия в донных отложениях реки. Для определения форм нахождения Be в донных отложениях использовали метод последовательной ступенчатой экстракции по Tessier et al. [13] в модификации Hakansson et al. [14]. Пробы донных отложений отбирались дночерпателем ГР-91, затем 100 г сырых донных отложений передавали для анализа на общее содержание в них элемента. После этого проводили определение содержания Be в разных химических фракциях донных отложений, для чего 1 г сырых донных отложений последовательно экстрагировали на водяной бане 100 мл соответствующих растворов с последующим определением содержания в растворах. В результате были получены данные по распределению Be в следующих химических фракциях донных отложений: обменные ионы, карбонаты и гидроксиды; водные оксиды; подвижное органическое вещество и аморфные сульфиды; стабильное органическое вещество (фульво- и гуминовые кислоты); консолидированное органическое вещество, оксиды и суль-

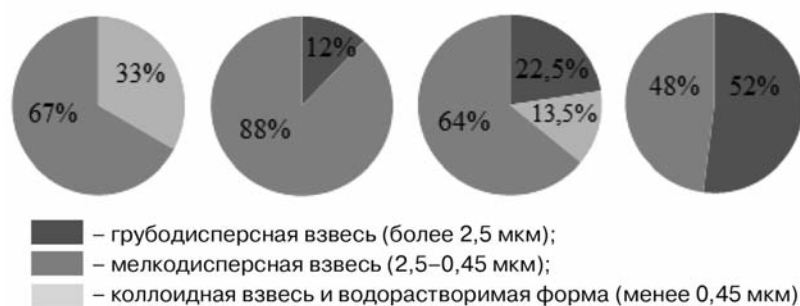


Рис. 3. Распределение Be по фракциям и его общее содержание в воде и водной взвеси, мг/л, в точках отбора проб 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г):
а – $0,160 \times 10^{-3}$; б – $3,186 \times 10^{-3}$; в – $0,173 \times 10^{-3}$; г – $0,057 \times 10^{-3}$

Fig. 3. Distribution of Be by fractions and its total content in water and suspended water, mg/l, at sampling points 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d):
a – $0,160 \times 10^{-3}$; b – $3,186 \times 10^{-3}$; c – $0,173 \times 10^{-3}$; d – $0,057 \times 10^{-3}$

фиды. По разнице между общим содержанием бериллия в донных отложениях и суммарным содержанием его в вышеперечисленных химических фракциях определяли содержание бериллия в неразлагаемом остатке.

Определение содержания Be в пробах воды и их фильтратах, а также в донных отложениях и их фракциях проводили в аккредитованном химико-аналитическом центре Институт промышленной экологии УрО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре ELAN 9000 ("PerkinElmer Inc.", США),

предел обнаружения бериллия 0,0005.

Результаты исследования

При попадании кислых шахтных вод в поверхностные водотоки происходит нейтрализация шахтных вод с образованием тонкодисперсной взвеси в результате выпадения из раствора гидроксидов алюминия и железа, которые способны сорбировать химические элементы, ранее содержащиеся в шахтных водах [15]. Содержание Be в речной воде и разных фракциях водной взвеси приведено на рис. 3. Общее содержание Be ниже перво-

Таблица 1. Содержание Be и объем его поступления в р. Косьву из основных источников загрязнения (I–VI) за 2020 г. [12]

Table 1. The Be content and the volume of its entry into the Kosva river from the main sources of pollution (I–VI) for 2020 [12]

Источник*	Дата опробования	Объем излива, м ³ /сут	pH	Содержание, мг/дм ³	Поступление, кг/год
I. Излив шахты Шумихинская	13,05	96	3,9	0,0200	1,17
	14,07	96			
	23,09	144			
II. Выход изливов шахты 40-лет Октября	07,05	144000	6,3	0,0001	9,98
	28,07	48408			
	28,09	31200			
III. Излив из шахты им. Калинина	07,05	18768	2,8	0,011	114,18
	22,07	21888			
	20,08	18000			
IV. Излив из штольни шахты им. 1 мая	07,05	3840	2,6	0,0073	6,83
	22,07	1752			
	20,08	936			
V. Излив из трубоного ходка шахты им. Крупской	30,04	1200	3,1	0,026	13,9
	20,08	1992			
	14,09	168			
VI. Выход изливов шахты Нагорная	07,05	3600	3,1	0,013	8,14
	22,07	1344			
	12,10	72			
Итого:					154,2

* См. рис. 1.

Таблица 2. Содержание Ве в разных химических фракциях донных отложений р. Косьвы, %

Table 2. Be content in various chemical fractions of bottom sediments of the river Kosva, %

Фракция донных отложений	Точки отбора проб (см. рис. 1)			
	1	2	3	4
Обменные ионы, карбонаты и гидроксиды	0	0	0	0
Водные оксиды	4	1	4	7
Подвижное органическое вещество и аморфные сульфиды	20	7	3	19
Стабильное органическое вещество – фульво- и гуминовые кислоты	0	0	0	0
Консолидированное органическое вещество, оксиды и сульфиды	35	0	4	2
Неразлагаемый остаток	41	91	89	72
Общее содержание Ве в донных отложениях*	1,77±0,71	2,94±1,18	2,08±0,83	1,82±0,73

*мг/л.

го по течению излива шахты Шумихинская (точка отбора 1) находилось на уровне ПДК_{рх}, что объясняется относительно небольшим объемом излива по отношению к среднегодовому расходу в р. Косье (менее 0,01 %). Ниже по течению всех основных источников поступления количество Ве (точка отбора 2) превышало ПДК_{рх} в 100 раз (0,03 мг/л), далее по течению постепенно снижалось до значений ПДК_{рх} и ниже. Результаты анализов показывают, что в речных водах Ве переносится в основном в водорастворимой форме и с частицами коллоидного размера.

Известно, что фракция тонкодисперсных частиц является преимущественным концентратом большей части микроэлементов [13], что также подтверждается результатами, полученными авторами. Агрегация частиц между собой с образованием взвеси более крупного размера приводит к тому, что по мере удаления от источника загрязнения наблюдается постепенное увеличение содержания Ве в грубодисперсной водной взвеси. При этом следует отметить снижение общего содержания элемента в воде, что может быть объяснено постепенным осаждением взвеси, содержащей Ве, на дно р. Косьва и на-

копление ее в виде донных отложений.

В результате поступления в реку кислых шахтных вод и других источников содержание Ве в донных отложениях возрастает до 2,94 мг/кг (точка отбора 2), но по мере удаления от источников загрязнения снижается до 1,82 мг/кг (точка отбора 4). Таким образом, в качестве сорбционного барьера для Ве выступает речная взвесь коллоидного размера, которая переносится с потоком воды и постепенно осаждается на дне, что приводит к закономерному снижению содержания элемента в донных отложениях по мере удаления от источника его поступления в речные воды. Конечной зоной аккумуляции является Камское водохранилище — источник водоснабжения миллионного г. Перми.

Результаты по содержанию Ве в разных химических фракциях донных отложений р. Косьва представлены в табл. 2. Обращает на себя внимание содержание Ве во фракциях водных оксидов и подвижном органическом веществе, а также аморфных сульфидах. Возможность накопления бериллия в гидроксиде железа и марганца, а также накопление его гумусовым органическим веществом отмечалось в работе [3]. Согласно [16],

фракции водных оксидов, подвижного органического вещества и аморфных сульфидов относятся к химически подвижной и кислоторастворимой соответственно. Обе эти фракции могут высвобождать Ве в окружающую среду при изменении геохимических условий, например в условиях закисления, которое может происходить при сезонном увеличении объемов поступающих в реку кислых шахтных вод. Юдович Я.Э. и Кетрис М.П. также отмечают возможность высвобождения в условиях кислой среды бериллия из соединений, в состав которых он входил [3]. Включение Ве в состав труднорастворимых соединений фракции неразлагаемого остатка требует дальнейшего изучения.

Заключение

Загрязнение Ве речных вод и донных отложений под влиянием кислых шахтных вод КУБ представляет собой серьезную экологическую проблему.

Ниже по течению от зоны изливов в водах р. Косьвы содержание Ве увеличивается до 15 ПДК, общее поступление оценивается около 154 кг в год, переносится он в основном в водорастворимой форме и с частицами коллоидного размера. В донных отложениях Ве накапливается и мигрирует в составе влекомых течением частиц (твёрдого стока) во фракциях водных оксидов и подвижном органическом веществе.

Накопившиеся в русле р. Косьвы техногенные донные отложения, образовавшиеся в результате смешения кислых шахтных вод с речными, могут явиться источником вторичного загрязнения вод реки и зоны аккумуляции осадков в Камском водохранилище высокотоксичным металлом. В связи с планируемой экологической реабилитацией территории КУБ и разработкой природоохранных мероприятий по восстановлению экосистемы р. Косьвы необходимо учитывать выявленные особенности миграции и аккумуляции Ве.

Исследование выполнено при поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2023.

The research was supported by the Perm Research and Education Centre for Rational Use of Subsoil, 2023.

Литература

1. Клер В.Р., Волкова Г.А., Гурвич Е.М. и др. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Геохимия элементов. М., Наука, 1987. 239 с.
2. Кизильштейн Л.Я. Бериллий в ископаемых углях: геохимия, ресурсы, экология. Природа. 2018. № 8. С. 67–69.
3. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург, УрО РАН, 2005. 649 с.
4. Ермаков А.Ю., Гришин В.Ю., Бородкин П.С. Концепция модернизации угольных обогатительных фабрик. Уголь, 2022. № 8. С. 122–129.
5. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения: монография. Пермь, Перм. гос. нац. исслед. Ун-т, 2018. 288 с.
6. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М., Минприроды России, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. 684 с.
7. ГОСТ "Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности" № 1977-01-01. Утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 10.03.1976 № 579 (ред. от 28.03.1990) М., Стандартинформ, 2007. 10 с. Автор! Кто издавал? Или URL? Так?
8. Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей. Под ред. Н.В. Лазарева, И.Д. Гадаскиной. В 3х т. Т. III. Л., Химия, 1977. 608 с.
9. Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды. Пермь, Изд-во ПГУ, 2011. 248 с.
10. Максимович Н.Г. Создание геохимических барьеров для очистки кислых стоков породных отвалов. Уголь. 2006. № 9(965). С. 64–65.
11. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы. Научно-прикладной справочник. Под ред. В.Ю. Георгиевского. [Электронный ресурс]. 135 с. Автор! URL и дата обращения?
12. Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна. [Электронный ресурс]. URL: <http://kub.maps.psu.ru/> (дата обращения 16.05.2023 г.).
13. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry. 1979. Vol. 51. P. 844–851.
14. Håkansson K., Karlsson S., Allard B. Effects of pH on the accumulation and redistribution of metals in a polluted stream bed sediment. The Science of the Total Environment. 1989. Vol. 87/88. P. 43–57.
15. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк О.С., Решетняк В.Н. Донные отложения как индикатор первичного и источника вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса. Известия РАН. Сер. Географическая. 2020. Т. 84. № 2. С. 259–271.
16. Ranville M., Rough D., Flegal A.R. Metal attenuation at the abandoned Spenceville copper mine. Applied Geochemistry. 2004. Vol. 19. Iss. 5. P. 803–815.

References

1. Kler V.R., Volkova G.A., Gurvich E.M. i dr. Metallogeniya i geokhimiya ughlenosnykh i slantsesoderzhashchikh tolshch SSSR. Geokhimiya elementov. M., Nauka, 1987. 239 s.
2. Kizil'shtein L.Ya. Berillii v iskopaemykh uglyakh: geokhimiya, resursy, ekologiya. Priroda. 2018. № 8. S. 67–69.
3. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Toksichnye elementy-primesi v iskopaemykh uglyakh. Ekaterinburg, UrO RAN, 2005. 649 s.
4. Ermakov A.Yu., Grishin V.Yu., Borodkin P.S. Kontseptsiya modernizatsii ugol'nykh obogatitel'nykh fabrik. Ugol', 2022. № 8. S. 122–129.
5. Maksimovich N.G., P'yankov S.V. Kizelovskii ugol'nyi bassein: ekologicheskie problemy i puti resheniya: monografiya. Perm', Perm. gos. nats. issled. Un-t, 2018. 288 s.
6. O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu. Gosudarstvennyi doklad. M., Minprirody Rossii, MGU im. M.V. Lomonosova, 2022. 684 s.
7. GOST "Mezhgosudarstvennyi standart. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vrednye veshchestva. Klassifikatsiya i obshchie trebovaniya bezopasnosti" № 1977-01-01. Utv. i vveden v deistvie Postanovleniem Gosstandarta SSSR ot 10.03.1976 № 579 (red. ot 28.03.1990) M., Standartinform, 2007. 10 s.
8. Vrednye veshchestva v promyshlennosti. Spravochnik dlya khimikov, inzhenerov i vrachei. Pod red. N.V. Lazareva, I.D. Gadaskinoi. V 3kh t. T. III. L., Khimiya, 1977. 608 s.
9. Maksimovich N.G., Khairulina E.A. Geokhimicheskie bar'ery i okhrana okruzhayushchei sredy. Perm', Izd-vo PGU, 2011. 248 s.
10. Maksimovich N.G. Sozdanie geokhimicheskikh bar'erov dlya ochistki kislykh stokov porodnykh otvalov. Ugol'. 2006. № 9(965). S. 64–65.
11. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki rek basseina Kamy. Nauchno-prikladnoi spravochnik. Pod red. V.Yu. Georgievskogo. [Elektronnyi resurs]. 135 s. Avtor! URL i data obrashcheniya?
12. Geoekologicheskaya geoinformatsionnaya sistema Kizelovskogo ugol'nogo basseina. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://kub.maps.psu.ru/> (data obrashcheniya 16.05.2023 g.).
13. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry. 1979. Vol. 51. P. 844–851.
14. Håkansson K., Karlsson S., Allard B. Effects of pH on the accumulation and redistribution of metals in a polluted stream bed sediment. The Science of the Total Environment. 1989. Vol. 87/88. P. 43–57.
15. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S., Reshetnyak V.N. Donnye otlozheniya kak indikator pervichnogo i istochnik vtornichnogo zagryazneniya rechnykh vod uglepromyshlennykh territorii Vostochnogo Donbassa. Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya. 2020. T. 84. № 2. S. 259–271.
16. Ranville M., Rough D., Flegal A.R. Metal attenuation at the abandoned Spenceville copper mine. Applied Geochemistry. 2004. Vol. 19. Iss. 5. P. 803–815.

Н.Г. Максимович – канд. геол.-минерал. наук, зам. директора по научной работе, Пермский государственный национальный исследовательский университета (ПГНИУ), e-mail: nmax@psu.ru ● В.Т. Хмурчик – д-р геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ПГНИУ, e-mail: khmurchik.vadim@mail.ru ● О.А. Березина – канд. географ. наук, доцент, ПГНИУ, e-mail: berezina.olga16@gmail.com ● А.Д. Деменив – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ПГНИУ, e-mail: demenivartem@gmail.com ● А.В. Татаркин – д-р техн. наук, профессор, ПГНИУ, e-mail: vsto08@mail.ru

N.G. Maksimovich – Cand. Sci. (Geol.-mineral.), Deputy Director for Scientific Work, Perm State National Research University (PSNRU), e-mail: nmax@psu.ru ● V.T. Khmurchik – Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Leading Research Fellow, PSNRU, e-mail: khmurchik.vadim@mail.ru ● O.A. Berezina – Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, PSNRU, e-mail: berezina.olga16@gmail.com ● A.D. Demenev – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Research Associate, PSNRU, e-mail: demenivartem@gmail.com ● A.V. Tatarkin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, PSNRU, e-mail: vsto08@mail.ru