

## МИГРАЦИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РЕЧНОЙ СИСТЕМЕ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ИЗЛИВОВ КИСЛЫХ ШАХТНЫХ ВОД КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Н.Г. Максимович<sup>1</sup>, В.Т. Хмурчик<sup>1</sup>, О.А. Березина<sup>1</sup>, А.Д. Деменев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ),  
Пермь, Россия, e-mail: berezina.olga16@gmail.com

**Аннотация:** Разработка угольных месторождений шахтным способом часто сопровождается формированием кислых вод, в которых содержится большое количество микроэлементов. При ликвидации угольных шахт способом затопления после восстановления уровня подземных вод образуются изливы кислых шахтных вод на земную поверхность. При поступлении их в речную сеть происходит нейтрализация и выпадение осадка гидроксидов металлов, на котором сорбируется большинство микроэлементов. Взвесь, переносимая течением реки, имеет тенденцию к осаждению вследствие разницы ее плотности с плотностью воды, при этом частицы более мелкого размера переносятся течением реки на большее расстояние. Процессы взаимодействия донных осадков с водой и миграция микроэлементов в системе «вода – донные отложения» зависят от многих факторов, таких как дефицит растворенного кислорода на границе контакта донных отложений и воды, значение pH, гранулометрический состав донных отложений, природа элемента и минерализация вод. Большую роль также играют гидродинамические процессы в водоеме. Изучен участок р. Косьвы, расположенной на востоке Пермского края, в пределах Кизеловского угольного бассейна, где осуществлялась добыча угля до начала XX в. После восстановления уровня подземных вод сформировались изливы кислых шахтных вод с опасным для окружающей среды химическим составом. В ходе исследования были выделены гидрохимические зоны и седиментационные барьеры. Выявлены закономерности распределения микроэлементов и их накопления в донных отложениях, что должно учитываться при планировании и разработке мероприятий по очистке рек от техногенного донного осадка.

**Ключевые слова:** кислые шахтные воды, микроэлементы, речные системы, донные отложения, седиментационные барьеры, Кизеловский угольный бассейн, загрязнение поверхностных вод.

**Благодарность:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-01081, <https://rscf.ru/project/23-77-01081/>.

**Для цитирования:** Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т., Березина О. А., Деменев А. Д. Миграция микроэлементов в речной системе в зоне влияния изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 2. – С. 23–34. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_2\_0\_23.

---

## Migration of microelements in river system in impact zone of acid mine water discharge in the Kizel Coal Basin

N.G. Maksimovich<sup>1</sup>, V.T. Khmurchik<sup>1</sup>, O.A. Berezina<sup>1</sup>, A.D. Demenev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Perm State National Research University, Perm, Russia,  
e-mail: berezina.olga16@gmail.com

---

**Abstract:** Underground coal mining is often accompanied with generation of acid water which contains many microelements. In closure of coal mines by flooding, after groundwater level recovery, acid mine water can flow out on ground surface. When entering a river system, acid mine water gets neutralized, metal hydroxides precipitate, and most microelements adsorb at this deposition. Suspended sedimentation, when carried by stream, tends to precipitate as its density differs from water density, while fine particles are carried farther by river water. The bottom sediment and water interaction as well as migration of microelements in the bottom sediment–water system depends on many factors such as deficiency of dissolved oxygen at the bottom sediment–water interface, pH value, grain-size composition of bottom sediment, nature of an element and water mineralization. Hydrodynamics of a water body is also important. The test site of the Kosva river is located in the east of the Perm Krai within the Kizel Coal Basin where coal mining proceeded until the early 20th century. After recovery of groundwater level, acid mine water with the environmentally hazardous chemical composition started to discharge on ground surface. The implemented research identified hydrochemical zones and sedimentation barriers. The revealed patterns of microelements and their accumulation in bottom sediment should be taken into account in planning and implementation of activities aimed at removal of manmade bottom sediment from rivers.

**Key words:** acid mine water, microelements, river systems, bottom sediment, sedimentation barriers, Kizel Coal Basin, surface water pollution.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-77-01081, <https://rscf.ru/project/23-77-01081/>.

**For citation:** Maksimovich N. G., Khmurchik V. T., Berezina O. A., Demenev A. D. Migration of microelements in river system in impact zone of acid mine water discharge in the Kizel Coal Basin. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(2):23-34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_2\_0\_23.

---

### Введение

Добыча угля шахтным способом влечет значительные экономические, экологические, гидрологические и геоморфологические последствия [1–3]. Негативное влияние кислых шахтных вод (КШВ) на окружающую среду, в том числе на речные системы, наблюдается во многих регионах мира, где существуют предприятия горнодобывающей или угольной промышленности [4, 5].

Разработка месторождений Кизеловского угольного бассейна (КУБ) шахтным способом на востоке Пермского края, начатая в 1796 г., полностью прекратилась в начале XXI в. (см. рис. 1). Шахты были ликвидированы способом затопления, что привело к появлению изливов КШВ после восстановления уровня подземных вод [6, 7]. На сегодняшний день известно 19 изливов КШВ, их объем составляет от 25 до 75 млн м<sup>3</sup> в год, рН

1–3, максимальное содержание (по данным за 2020 г.) железа  $2730 \text{ мг/дм}^3$ , алюминия  $210 \text{ мг/дм}^3$ , марганца  $25 \text{ мг/дм}^3$  и др., которые попадают в один из наиболее уязвимых элементов ландшафта – поверхностные водные объекты. Далее происходит нейтрализация КШВ и выпадение осадка гидроксидов железа и алюминия, на которых сорбируется большинство микроэлементов [8, 9].

Речные системы обладают высокой динамичностью, которая зависит от гидрометеорологических факторов и гидродинамических характеристик, в связи с этим происходит миграция микроэлементов как в водах, так и в донных отложениях вниз по течению [10, 11].

Целью исследования являлось изучение влияния ликвидированных шахт КУБа на миграцию микроэлементов в речных системах Пермского края, на примере р. Косьвы.

### Объект и методы исследований

Исследования выполнены на участке р. Косьвы от Широковского водохранилища до Косьвинского залива Камского водохранилища. Река является крупным левобережным притоком водохранилища, берет начало на западном склоне Среднего Урала (см. рис. 1), длина составляет  $283 \text{ км}$ , площадь водосбора  $6300 \text{ км}^2$ , уклон изменяется от 3% в верховьях до 1,8% в нижнем течении, средняя его высота  $404 \text{ м}$ , коэффициент густоты речной сети около  $0,21 \text{ км/км}^2$  [12]. Режим реки, являющейся нижним бьефом водохранилища, зависит от работы Широковской ГЭС, расходы колеблются в широких пределах – от  $1,5$  до  $117 \text{ м}^3/\text{с}$ .

При впадении в Камское водохранилище образуется значительная по размерам акватория – Косьвинский залив, его морфометрические характеристики

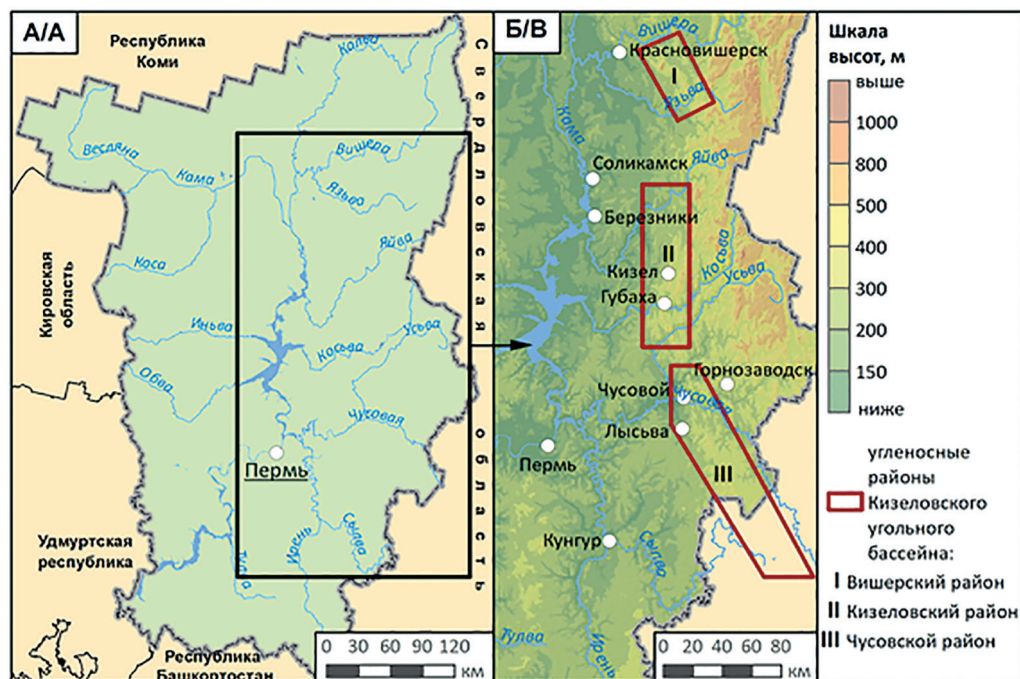


Рис. 1. Местоположение Кизеловского угольного бассейна

Fig. 1. Location of the Kizel coal basin

напрямую зависят от режима работы Камской ГЭС. Происходит значительное изменение ширины и площади при нормальном подпорном уровне и при уровне сработки, 95 км<sup>2</sup> и 2 км<sup>2</sup> соответственно, средняя ширина изменяется от 4,7 до 0,1 км [13].

На водосборе находились ликвидированные шахты: имени Н.К. Крупской, имени 1 Мая, имени Калинина, имени 40-летия Октября, «Нагорная». В настоящий момент известно 8 изливов КШВ. Основным источником загрязнения является излив шахты имени Калинина и шурфа 17 шахты имени 40-летия Ок-

тября, на их долю приходится 77% от общего объема (2020 г.) (табл. 1).

Определение современного экологического состояния реки являлось одной из основных задач исследований. В ходе полевых исследований производили параллельный отбор проб воды и донных отложений (рис. 2). Для определения содержания микроэлементов в воде пробы отбирали в предварительно промытые дистиллированной водой пластиковые бутылки объемом 0,5 л и консервировали азотной кислотой.

В пробах воды определяли следующие показатели: TDS (Total Dissolved Solids),

Таблица 1

**Характеристика основных источников загрязнения р. Косьювы кислыми шахтными водами за 2020 г.**

**Characteristics of main pollution sources at the of the Kos`va River by acid mine waters in 2020**

№ п/п	Источник загрязнения	Дата отбора	pH	Содержание элементов, мг/дм <sup>3</sup>							Дебет, м <sup>3</sup> /сут
				Fe <sub>общ</sub>	Zn	Pb	Cu	Mn	Co	Ni	
1	Излив шахты «Шумихинская»	13 май	3,9	1291	0,22	0,028	0,01	9,4	0,62	0,75	96
		14 июл	4,2	1810	0,27	0,001	0,009	11	0,65	2,4	96
		23 сен	5	1661	0,31	0,002	0,019	12	0,3	0,46	144
2	Выход изливов шахты имени 40-летия Октября (родник 407)	07 май	6,3	8,38	0,033	0,001	0,002	0,3	0,008	0,007	144 000
		28 июл	6,5	0,91	0,046	0,007	0,007	0,62	0,012	0,027	48 408
		28 сен	5,9	3,5	0,088	0,001	0,005	0,85	0,019	0,037	31 200
3	Излив из шахты имени Калинина	07 май	2,8	732	0,11	0,001	0,017	6,3	0,04	0,064	18 768
		22 июл	2,9	1015	0,17	0,001	0,011	11	0,12	0,23	21 888
		20 авг	3,1	1161	0,19	0,031	0,006	10	0,12	0,22	18 000
4	Излив из штольни шахты имени 1 Мая	07 май	2,6	113	0,053	0,022	0,021	1,6	0,03	0,071	3840
		22 июл	2,6	82	0,071	0,013	0,023	2,5	0,13	0,18	1752
		20 авг	2,5	84	0,086	0,001	0,02	2,3	0,13	0,19	936
5	Излив из трубного ходка шахты имени Н.К. Крупской	30 апр	3,1	1121	0,41	0,033	0,02	9,3	0,008	0,24	1200
		20 авг	3,5	1570	0,44	0,03	0,009	13	0,3	0,62	1992
		14 сен	3,5	1835	0,55	0,001	0,012	16	0,38	0,64	168
6	Выход изливов шахты «Нагорная»	07 май	3,1	300	0,23	0,001	0,007	1,5	0,0001	0,36	3600
		22 июл	4	244	0,12	0,007	0,003	1,9	0,0001	0,3	1344
		12 окт	4,1	270	0,13	0,004	0,006	1,8	0,0001	0,26	72

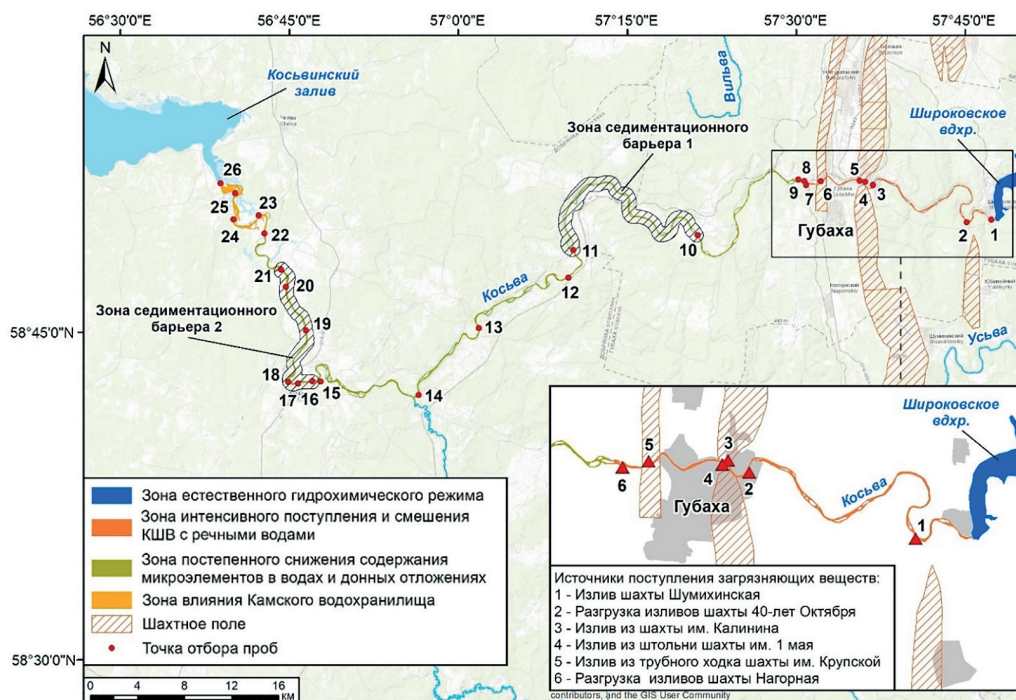


Рис. 2. Местоположение точек отбора проб, гидрохимических зон и седиментационных барьеров  
Location places of sampling, hydrochemical zones and sedimentation barriers

pH,  $Fe_{\text{общ}}$ . Содержание микроэлементов в пробах воды и донных отложениях определяли по следующему спектру компонентов: Zn, Pb, Cu, V, Mn, Co, Ni, Sr.

Пробы донных отложений в лабораторных условиях сушили на воздухе при комнатной температуре, измельчали до размера частиц менее 0,2 мм и передавали на химический анализ. Содержание микроэлементов определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с использованием масс-спектрометра Aurora M90 (Германия).

После специальной пробоподготовки донных отложений на шаровой мельнице Pulverisette-5 (Германия) выполнялся их минералогический анализ на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 Phaser (Германия).

Содержание  $Fe_{\text{общ}}$  в пробах определяли при помощи спектрофотометра

«UNICO» (США), показатели TDS и pH определяли в полевых условиях, используя комбинированный анализатора воды HI98129 Combo (Германия).

### Результаты и их обсуждение

Результаты исследования показывают, что при поступлении в речные воды кислых шахтных вод в зоне смешения вод происходит снижение значения pH вод до слабокислого, которое ниже по течению восстанавливается до практически первоначального значения. Это обусловлено тем, что среднееголетний суммарный объем изливов шахтных вод, поступающих в р. Косью, составляет не более 1,3% от ее расхода воды.

Кислые шахтные воды привносят в реки большое количество водорастворенного железа, в основном в виде ионов  $Fe^{2+}$ , которые постепенно окисляются до трехвалентного состояния, гидролизу-

Таблица 2

Характеристика поверхностных вод и донных отложений в разных гидрохимических зонах р. Косывы  
 Characteristics of surface waters and bottom sediments in different hydrochemical zones of the Kos'va River

Зоны/ барьеры	Расстояние от Широковской ГЭС, км	TDS	pH	Fe <sub>общ</sub>	Содержание микроэлементов, мг/дм <sup>3</sup> / мг/кг										Σ микро- элементов
					Zn	Pb	Cu	V	Mn	Co	Ni	Sr			
1	0,36 (до 1 т.о.)	18	7,3	0,27	-/82,5	-/1,01	-/23,4	-/24,1	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/131
2	3,4 – 25,2 (1 – 9 т.о.)	387	5,1	29,6	0,062/ 738	0,00077/ 23,4	0,024/ 41,7	0,0019/ 116	1,77/ 1090	0,098/ 26,1	0,12/ 58,4	0,22/ 83,1	2,3/ 2176		
3	25,2 – 109,7 (9 – 22 т.о.)	656	7	5,5	0,001/ 317	<0,0001/ 31,57	0,0011/ 70,8	0,0017/ 128	0,028/ 434	0,00028/ 34,6	0,0013/ 58,3	0,73/ 101	0,76/ 1175		
4	117,3 – 124,4 (23 – 26 т.о.)	165	7,9	3,21	0,0029/ 121	0,0003/ 13,3	0,0014/ 33,8	0,0012/ 112	0,025/ 826	0,0008/ 27,8	0,0019/ 55	0,3/ 149	0,33/ 1338		
1 барьер	40,3 – 60,2 (10 – 11 т.о.)	255	7,4	5	0,0053/ 712	0,00018/ 14,1	0,0015/ 28,7	<0,001/ 59,5	0,097/ 1656	0,0016/ 34	0,0038/ 52,6	0,087/ 155	0,19/ 2711		
2 барьер	96,4 – 109,7 (16 – 21 т.о.)	372	7,1	1,86	0,11/ 237	0,00079/ 21,5	0,0015/ 67,6	0,0013/ 130	0,079/ 940	0,00075/ 27	0,0033/ 60,9	0,78/ 196	0,98/ 1680		

\* В числителе – пробы вод, в знаменателе – пробы донных отложений, приведены максимальные значения.

ются и образуют нерастворимый в воде осадок, содержащий большое количество микроэлементов. Он переносится течением и осаждается в русле реки, а во время повышения расхода воды — также на прибрежной растительности и в пойме, что характерно для многих водотоков, в которые поступают КШВ [14].

По интенсивности накопления техногенных отложений по течению р. Косьвы можно выделить несколько зон.

На участке от Широковской ГЭС, 0,3 км вниз по течению до первого источника поступления КШВ (до точки отбора (т.о.) 1) — зона естественного гидрохимического режима, воды которой характеризуется гидрокарбонатно-кальциевым составом, рН 7,3, общая минерализация 37 мг/дм<sup>3</sup>, Fe<sub>общ</sub> 0,15 мг/дм<sup>3</sup> (см. рис. 2). В донных отложениях отсутствуют техногенные включения, встречается кальцит, доломит.

*Зона активного поступления и смешения КШВ с речными водами:* 3,4–25,2 км от плотины Широковской ГЭС (т.о. 2–9), где рН вод снижается до 5,1, состав меняется на сульфатно-хлоридно-натриевый, общее содержание микроэлементов до 2,2 мг/дм<sup>3</sup>, Fe<sub>общ</sub> 90,2 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 2, рис. 2). В донных отложениях резко увеличивается общее содержание микроэлементов до 2176 мг/дм<sup>3</sup>, встречаются техногенные минералы: ярозит, гетит и др.

*Зона постепенного снижения.* Содержание микроэлементов в водах и донных отложениях по длине реки 25,2–109,7 км от плотины Широковской ГЭС (т.о. 9–22), рН вод повышается до 8, состав меняется на сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый, общее содержание микроэлементов снижается до 0,33 мг/дм<sup>3</sup>, Fe<sub>общ</sub> до 1,35 мг/дм<sup>3</sup> (см. рис. 2). В донных отложениях общее содержание микроэлементов снижается до 685 мг/дм<sup>3</sup>, встречается техногенный минерал — ярозит.

По данным наших исследований, этот процесс прослеживается на значительных расстояниях, до 58 км (т.о. 9–14), даже при снижении скорости потока за счет меандрирования р. Косьвы на данном участке. Подобные результаты получены Munk et al. (2002), которые изучали прямолинейный участок р. Снэйк, расположенной в США, штат Колорадо, от впадения в нее КШВ и на протяжении 60 м ниже по течению. Они выявили снижение содержания микроэлементов в донных отложениях по мере удаления от точки поступления шахтных вод вследствие уменьшения содержания микроэлементов в растворенном виде в ходе реакций осаждения и сорбции [15].

Внутри этой зоны можно выделить несколько участков резкого изменения компонентов в водах и донных отложениях — гидродинамические седиментационные барьеры (см. рис. 2).

Первый располагается на расстоянии 40,3–60,2 км от плотины Широковской ГЭС (т.о. 10, 11), здесь наблюдается активное накопление в донных отложениях микроэлементов, их максимальная сумма для всего исследуемого участка — 2711 мг/дм<sup>3</sup> (см. табл. 2). Второй барьер расположен с 96,4 по 109,7 км (т.о. 16–21), где наблюдается изменение гидродинамических условий — русло реки резко изгибается, скорость течения снижается, в результате чего увеличивается содержание микроэлементов в донных отложениях за счет их осаждения и накопления.

Также можно выделить зону влияния Камского водохранилища, которая расположена с 117,3 по 124,4 км от плотины Широковской ГЭС (т.о. 23–26) (см. рис. 2). Она характеризуется увеличением общего содержания водорастворенного железа и доли в нем железа в трехвалентном состоянии (до 80%). Это может являться указанием на границу,

до которой распространяется влияние водных масс Камского водохранилища, вследствие распространения подпора. В этой же точке наблюдается граница резкого изменения в речной воде и донных отложениях общего содержания микроэлементов (с 0,7 – 0,9 до 0,3 мг/дм<sup>3</sup>). Изменение гидрохимического состава также может быть обусловлено повышением содержания в речных водах в зоне влияния водных масс Камского водохранилища гуминовых соединений с содержанием водорастворенного железа до 2 мг/дм<sup>3</sup>, что обусловлено высокой заболоченностью северной части водосбора [16].

Гуминовые соединения характеризуются комплексобразующими свойствами и увеличивают адсорбцию микроэлементов на поверхности нерастворимых гидроксидов железа [17], вследствие чего ионы металлов удаляются из раствора.

Отметим также, что в пробах воды, отобранных как до, так и после 115 км (т.о. 22), основной вклад в общее загрязнение речных вод микроэлементами вносят марганец и стронций (86 – 99%). Однако соотношение между этими микроэлементами изменялось по течению р. Косьва. Так, в пробе воды, отобранной выше поступления в реку КШВ (т.о. 3), содержание стронция составляло 69% от общего содержания микрокомпонентов, а содержание марганца – 24%, при этом содержание каждого из них не превышало значения ПДК для рыбохозяйственных водных объектов. После смешения речных вод с кислыми шахтными водами основная роль в загрязнении микроэлементами переходила от стронция к марганцу – доля марганца в общем содержании микроэлементов в воде составляла 49 – 83%, доля стронция – 3 – 44%. На значительном удалении от места поступления кислых шахтных вод основная роль в за-

грязнении воды микроэлементами снова возвращалась к стронцию – доля стронция составляла 82 – 96%, доля марганца – 3 – 11%.

В донных отложениях на всем протяжении исследованного русла р. Косьвы основной вклад в общее содержание микроэлементов привносит марганец, однако после поступления в реку кислых шахтных вод вклад марганца снижался вследствие накопления в донных отложениях других элементов, особенно цинка, стронция и ванадия.

### **Заключение**

При поступлении высокоминерализованных КШВ в речную сеть и смешивании их с речными водами происходит нейтрализация шахтных вод, приводящая к небольшому сдвигу рН речных вод в зоне смешения в кислую сторону. Эти условия благоприятствуют гидролизу ионов трехвалентного железа, содержащихся в растворе, и образованию нерастворимого мелкодисперсного осадка гидроксида железа, на котором сорбируется часть микроэлементов, ранее содержащихся в шахтных водах, и который в виде взвеси переносится речными водами вниз по течению. Часть микроэлементов остается в водорастворенном состоянии и переносится течением реки в таком виде. Ниже зоны смешения рН речных вод восстанавливается вследствие полной нейтрализации шахтных вод в результате их значительного разбавления речными водами.

Взвесь, переносимая течением реки, имеет тенденцию к осаждению вследствие разницы ее плотности с плотностью воды, при этом частицы более мелкого размера переносятся течением реки на большее расстояние. Это приводит к тому, что ниже зоны смешения дно реки покрывается постепенно нарастающим слоем техногенного осадка. Особенно значительное накопление



техногенного осадка, содержащего вынесенные с шахтными водами микроэлементы, происходит на участках изменения гидродинамического режима реки, где образуются седиментационные барьеры. На исследованном участке р. Косьва наблюдается два таких барьера на участках с высокой меандрированностью русла, существование третьего, самого нижнего по течению реки, барьера обусловлено изменением гидродинамического режима реки вследствие подпора Камским водохранилищем. Содержание микроэлементов в донных отложениях последовательных седиментационных барьеров, а значит, и количество осажденного техногенного осадка в них, были обратно пропорциональны их расстоянию до зоны смешения шахт-

ных и речных вод. Техногенный осадок, накопившийся в русле р. Косьва, в том числе и на седиментационных барьерах, может явиться источником вторичного загрязнения реки микроэлементами вследствие их десорбции из осадка в результате изменения гидродинамических [18], кислотно-щелочных или окислительно-восстановительных условий [19, 20] вод реки.

Таким образом, выявленные в результате исследования закономерности миграции микроэлементов и их накопления в донных отложениях необходимо учитывать при планировании и разработке мероприятий по очистке рек от техногенного осадка, образовавшегося в результате смешения кислых шахтных вод с речными.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acharya B. S., Kharel G. Acid mine drainage from coal mining in the United States — An overview // *Journal of Hydrology*. 2020, vol. 588. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125061.
2. Chen Ming, Fengguo Li, Meixia Tao, Lanwen Hu, Yanli Shi, Youcun Liu Distribution and ecological risks of heavy metals in river sediments and overlying water in typical mining areas of China // *Marine Pollution Bulletin*. 2019, vol. 146, pp. 893–899. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.029.
3. Olds W. E., Weber P. A., Pizey M. H., Pope J. Acid mine drainage analysis for the Reddale Coal Mine, Reefton, New Zealand // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2016, vol. 59, no. 2, pp. 341–351. DOI: 10.1080/00288306.2016.1148056.
4. Янин Е. П. Особенности воздействия на окружающую среду разработки угольных месторождений // *Экологическая экспертиза*. — 2019. — № 6. — С. 2–59. DOI: 10.36535/0869-1010-2019-06-1.
5. Sutapa R., Kaushik D. Coal mine water drainage: The current status and challenges // *Journal of the Institution of Engineers India: Series D*. 2020, vol. 101, no. 2, pp. 165–172. DOI: 10.1007/s40033-020-00222-5.
6. Рыбников П. А., Рыбникова Л. С., Максимович Н. Г., Деменев А. Д. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Россия) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 3-1. — С. 475–487. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487.
7. Имайкин А. К., Имайкин К. К. Изменение гидрогеологических условий Шумихинского месторождения угля (Предуралье) под влиянием подземных горных работ // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. — 2022. — Т. 333. — № 7. — С. 64–75. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3482.
8. Максимович Н. Г., Пьянков С. В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. — Пермь: ПГНИУ, 2018. — 288 с.
9. Pyankov S. V., Maximovich N. G., Khayrulina E. A., Berezina O., Andrey Shikhov A., Abdullin R. K. Monitoring acid mine drainage's effects on surface water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 satellite images // *Mine Water and the Environment*. 2021, vol. 40, pp. 606–621. DOI: 10.1007/s10230-021-00761-7.

10. Wright I. A., Paciuszkiewicz K., Belmer N. Increased water pollution after closure of Australia's longest operating under-ground coal mine: A 13-month study of mine drainage, water chemistry and river ecology // *Water, Air and Soil Pollution*. 2018, vol. 229, article 55.

11. Фетисова Н. Ф. Исследование форм миграции металлов в реках, подверженных влиянию шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 141–152. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.

12. Menshikova E., Osovetsky B., Blinov S., Belkin P., Tomilina E., Badyanova I. Ochre particles in river sediments in coal mining areas (A study of the Kizel coal basin, Russia) // *Mine Water and the Environment*. 2022, vol. 41, pp. 1040–1054. DOI: 10.1007/s10230-022-00905-3.

13. Михалев В. В., Мацкевич И. К. Современная морфометрия Камского водохранилища // *Водное хозяйство России*. – 2010. – № 3. – С. 4–18.

14. Balintova M., Petrilaikova A., Singovszka E. Study of metals distribution between water and sediment in the Smolnik Creek (Slovakia) contaminated by acid mine drainage // *Chemical Engineering Transactions*. 2012, vol. 28, pp. 73–78. DOI: 10.3303/CET1228013.

15. Munk L., Faure G., Pride D. E., Bigham J. M. Sorption of trace metals to an aluminum precipitate in a stream receiving acid rock-drainage; Snake River, Summit County, Colorado // *Applied Geochemistry*. 2002, vol. 17, no. 4, pp. 421–430. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00098-1.

16. Мирошниченко С. А. Источники формирования железа в поверхностных водах реки Камы в пределах Пермского края // *Водное хозяйство России*. – 2011. – № 6. – С. 9–82.

17. Baran A., Mierzwa-Hersztek M., Gondek K., Tarnawski M., Szara M., Gorczyca O., Koniarz T. The influence of the quantity and quality of sediment organic matter on the potential mobility and toxicity of trace elements in bottom sediment // *Environmental Geochemistry and Health*. 2019, vol. 41, no. 6, pp. 2893–2910. DOI: 10.1007/s10653-019-00359-7.

18. Закруткин В. Е., Гибков Е. В., Решетняк О. С., Решетняк В. Н. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса // *Известия РАН. Серия Географическая*. – 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 259–271. DOI: 10.31857/S2587556620020168.

19. Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т., Березина О. А. Формы переноса микроэлементов в речной сети и распределение их во фракциях донных отложений в районах угледобычи // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 11. – С. 52–66. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_52.

20. Miao X., Song M., Xu G., Hao Y., Zhang H. The accumulation and transformation of heavy metals in sediments of Liujiang River Basin in Southern China and their threatening on water security // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, article 1619. DOI: 10.3390/ijerph19031619. **PLoS**

## REFERENCES

1. Acharya B. S., Kharel G. Acid mine drainage from coal mining in the United States – An overview. *Journal of Hydrology*. 2020, vol. 588. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125061.

2. Chen Ming, Fengguo Li, Meixia Tao, Lanwen Hu, Yanli Shi, Youcun Liu Distribution and ecological risks of heavy metals in river sediments and overlying water in typical mining areas of China. *Marine Pollution Bulletin*. 2019, vol. 146, pp. 893–899. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.029.

3. Olds W. E., Weber P. A., Pizey M. H., Pope J. Acid mine drainage analysis for the Reddale Coal Mine, Reefton, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2016, vol. 59, no. 2, pp. 341–351. DOI: 10.1080/00288306.2016.1148056.

4. Yanin E. P. Features of the impact on the environment of the development of coal deposits. *Ekologicheskaya ekspertiza*. 2019, no. 6, pp. 2–59. [In Russ]. DOI: 10.36535/0869-1010-2019-06-1.

5. Sutapa R., Kaushik D. Coal mine water drainage: The current status and challenges. *Journal of the Institution of Engineers India: Series D*. 2020, vol. 101, no. 2, pp. 165–172. DOI: 10.1007/s40033-020-00222-5.

6. Ribnikov P. A., Ribnikova L. S., Maksimovich N. G., Demenev A. D. Hydrogeology of the Kizel coal basin (Western Urals, Russia) in post-mining stage: the main problems and ways of their solution. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 475–487. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487.

7. Imaykin A. K., Imaykin K. K. Changes in hydrogeological conditions of the Shumikhinsky coal deposit (pre-urals) as a result of underground mining. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. GeoAssets Engineering*. 2022, vol. 333, no. 7, pp. 64 – 75. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3482.

8. Maksimovich N. G., P'yankov S. V. *Kizelovskiy ugol'nyy basseyn: ekologicheskie problemy i puti resheniya* [Kizel coal basin: environmental problems and solutions], Perm, PGNIU, 2018, 288 p.

9. Pyankov S. V., Maximovich N. G., Khayrulina E. A., Berezina O., Andrey Shikhov A., Abdullin R. K. Monitoring acid mine drainage's effects on surface water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 satellite images. *Mine Water and the Environment*. 2021, vol. 40, pp. 606 – 621. DOI: 10.1007/s10230-021-00761-7.

10. Wright I. A., Paciuszkiewicz K., Belmer N. Increased water pollution after closure of Australia's longest operating under-ground coal mine: A 13-month study of mine drainage, water chemistry and river ecology. *Water, Air and Soil Pollution*. 2018, vol. 229, article 55.

11. Fetisova N. F. Investigation of the forms of metal migration in rivers affected by mine waters of the Kizelovsky coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 1, pp. 141 – 152. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.

12. Menshikova E., Osovetsky B., Blinov S., Belkin P., Tomilina E., Badyanova I. Ochre particles in river sediments in coal mining areas (A study of the Kizel coal basin, Russia). *Mine Water and the Environment*. 2022, vol. 41, pp. 1040 – 1054. DOI: 10.1007/s10230-022-00905-3.

13. Mihalev V. V., Mackevich I. K. Modern morphometry of the Kama reservoir. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. 2010, no. 3, pp. 4 – 18. [In Russ].

14. Balintova M., Petrilakova A., Singovszka E. Study of metals distribution between water and sediment in the Smolnik Creek (Slovakia) contaminated by acid mine drainage. *Chemical Engineering Transactions*. 2012, vol. 28, pp. 73 – 78. DOI: 10.3303/CET1228013.

15. Munk L., Faure G., Pride D. E., Bigham J. M. Sorption of trace metals to an aluminum precipitate in a stream receiving acid rock-drainage; Snake River, Summit County, Colorado. *Applied Geochemistry*. 2002, vol. 17, no. 4, pp. 421 – 430. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00098-1.

16. Miroshnichenko S. A. Sources of iron formation in the surface waters of the Kama River within the Perm Territory. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. 2011, no. 6, pp. 9 – 82. [In Russ].

17. Baran A., Mierzwa-Hersztek M., Gondek K., Tarnawski M., Szara M., Gorczyca O., Koniarz T. The influence of the quantity and quality of sediment organic matter on the potential mobility and toxicity of trace elements in bottom sediment. *Environmental Geochemistry and Health*. 2019, vol. 41, no. 6, pp. 2893 – 2910. DOI: 10.1007/s10653-019-00359-7.

18. Zakrutkin V. E., Gibkov E. V., Reshetnyak O. S., Reshetnyak V. N. River sediments as river waters' primary pollution indicator and secondary pollution source in east Donbass coal-mining areas. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2020, vol. 84, no. 2, pp. 259 – 271. [In Russ]. DOI: 10.31857/S2587556620020168.

19. Maksimovich N. G., Khmurchik V. T., Berezina O. A. Forms of transfer of microelements in river network and their distribution in bottom sediments in coal mining regions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11, pp. 52 – 66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_52.

20. Miao X., Song M., Xu G., Hao Y., Zhang H. The accumulation and transformation of heavy metals in sediments of Liujiang River Basin in Southern China and their threatening on water security. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, article 1619. DOI: 10.3390/ijerph19031619.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Максимович Николай Георгиевич<sup>1</sup> – канд. геол.-минерал. наук, доцент, Заслуженный эколог РФ, заместитель директора по научной работе Естественного научного института, e-mail: nmax@psu.ru, ORCID ID: 0000-0001-6220-2730,

*Хмурчик Вадим Тарасович*<sup>1</sup> — д-р геол.-минерал. наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: khmurchik.vadim@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-7629-6168,  
*Березина Ольга Алексеевна*<sup>1</sup> — канд. геогр. наук,  
доцент, e-mail: berezina.olga16@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0001-6491-0722,  
*Деменев Артем Дмитриевич*<sup>1</sup> — канд. геол.-минерал. наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: demenevartem@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0003-1086-178X,  
<sup>1</sup> Пермский государственный национальный  
исследовательский университет (ПГНИУ).  
**Для контактов:** Березина О.А., e-mail: berezina.olga16@gmail.com.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*N.G. Maksimovich*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),  
Assistant Professor,  
Honored Ecologist of Russian Federation,  
Deputy Director for Scientific Work,  
Natural Science Institute,  
e-mail: nmax@psu.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6220-2730,  
*V.T. Khmurchik*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Geol. Mineral.),  
Leading Researcher,  
e-mail: khmurchik.vadim@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-7629-6168,  
*O.A. Berezina*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geogr.),  
Assistant Professor,  
e-mail: berezina.olga16@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0001-6491-0722,  
*A.D. Demenev*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),  
Senior Researcher,  
e-mail: demenevartem@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0003-1086-178X,  
<sup>1</sup> Perm State National Research University,  
614068, Perm, Russia.

**Corresponding author:** O.A. Berezina, e-mail: berezina.olga16@gmail.com.

Получена редакцией 21.04.2023; получена после рецензии 14.07.2023; принята к печати 10.01.2024.  
Received by the editors 21.04.2023; received after the review 14.07.2023; accepted for printing 10.01.2024.

