

ТЕХНОГЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ И КИСЛЫХ ШАХТНЫХ ВОД КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА

Н.Г. Максимович¹, А.Д. Деменев¹, В.Т. Хмурчик¹, О.А. Березина¹, А.А. Мизёв¹

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

Аннотация: Рассмотрен процесс образования и трансформации минералов в донных отложениях р. Косьювы, которая подвергается загрязнению шахтными водами Кизеловского угольного бассейна. Типоморфными минералами, образующимися при смешении кислых шахтных вод с речными водами, являются ярозит и гетит. Обнаружено, что содержание гетита в донных отложениях может достигать 92% от всех железосодержащих минералов, а содержание ярозита во фракции с размером частиц до 0,01 мм – 55% от всех минералов. При смешении шахтных вод с речными происходит образование взвеси, которая в дальнейшем выпадает в осадок и переносится потоком вниз по течению на значительные расстояния от источника загрязнения. Она содержит железистые минералы, являющиеся сорбентами микроэлементов. Для дальнейшего анализа динамики образования взвеси, содержащей загрязняющие компоненты, детально изучена зона наиболее интенсивного ее образования и выделен оптимальный участок для установки гидрохимических датчиков. Со временем происходит трансформация всех железосодержащих минералов в гетит. Однако так как трансформация минералов протекает через фазу их растворения, а образующийся в результате трансформации гетит обладает меньшими адсорбционными свойствами, чем исходные минералы, то адсорбированные микроэлементы могут высвобождаться в раствор и являться источником вторичного загрязнения. Изучение образования техногенной взвеси при помощи данных, получаемых с гидрохимических датчиков, позволит оценивать временную изменчивость поступления загрязняющих веществ.

Ключевые слова: Кизеловский угольный бассейн, кислые шахтные воды, зона смешения, техногенная взвесь, речные системы, техногенные минералы, ярозит, гетит, гидрохимические датчики, оперативный мониторинг.

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

Для цитирования: Максимович Н. Г., Деменев А. Д., Хмурчик В. Т., Березина О. А., Мизёв А. А. Техногенные минералы зоны смешения речных и кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 72–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_72.

Manmade minerals in mixing area of river and acid mine water in the Kizel Coal Basin

N.G. Maksimovich¹, A.D. Demenev¹, V.T. Khmurchik¹, O.A. Berezina¹, A.A. Mizev¹

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

Abstract: The article discusses formation and transformation of minerals in bottom sediment in the Kosva River contaminated with mine water of the Kizel Coal Basin. Typomorphic minerals formed in mixing of acid mine water and river water are jarosite and goethite. The content of goethite in bottom sediments can reach 92% of all iron-bearing minerals, and the content of jarosite in a fraction of particle size to 0.01 mm reaches 55% of all minerals. In mixing of mine and river water, a suspension appears, precipitates later on and flows with the river course down the stream for great distances from a contamination source. Such suspension contains ferric minerals which are sorbents of microelements. For the further analysis of formation dynamics of suspension with pollutant components, the zone of its most intensive origination is comprehensively examined, and an optimal site for hydrochemical sensors is identified. All iron-bearing minerals transform into goethite in the course of time. Transformation of minerals includes the phase of their solution, and resultant goethite possesses weaker adsorption properties as compared with the initial minerals. For this reason, adsorbed microelements can enter the solution and become a source of secondary contamination. The study of the formation of manmade suspension using the data obtained from the hydrochemical sensors can make it possible to estimate the time history of inflow of contaminants.

Key words: Kizel Coal Basin, acid mine water, mixing area, manmade suspension, river systems, manmade minerals, jarosite, goethite, hydrochemical sensors, real-time monitoring.

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., Demenev A. D., Khmurchik V. T., Berezina O. A., Mizev A. A. Manmade minerals in mixing area of river and acid mine water in the Kizel Coal Basin. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):72-87. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_72.

Введение

Разработка угольных месторождений влечет за собой образование изливов кислых шахтных вод (КШВ) во многих регионах мира [1 – 3]. При поступлении КШВ в водные объекты происходит их полная или частичная нейтрализация с образованием тонкодисперсной коллоидной взвеси, на которой сорбируется большинство микроэлементов, содержащихся в кислых водах [4, 5]. Агрегация тонкодисперсной взвеси приводит к образованию более крупных частиц, которые легче осаждаются [6]. Установлено, что агрегация частиц взвеси гидроксидов железа до размеров более 0,1 мкм занимает время в несколько десятков минут [7]. Осаждение взвеси приводит к тому, что дно водотоков покрывается слоем техногенных отложений, в раскры-

сталлизовавшейся массе которых часто присутствуют ярозит и гетит, иногда лепидокрокит и другие вторичные минералы.

Исследования выполнены на примере р. Косьвы, протекающей по территории Кизеловского угольного бассейна (КУБ), расположенного на Западном Урале. Территория бассейна подвержена постоянному воздействию кислых шахтных вод. При их попадании в природные воды происходит образование взвеси, представленной в основном аморфными гидроксидами железа и алюминия с высоким содержанием марганца, меди, никеля, цинка, свинца и других химических элементов [8], которая мигрирует вниз по течению, являясь источником загрязнения окружающей среды. Зона смешения КШВ и речных вод представ-

ляет собой особый интерес как объект исследований, так как здесь происходит активное образование взвеси, а также, на отдельных участках, техногенных минералов, таких как ярозит, гетит.

Традиционные способы мониторинга не позволяют улавливать сезонные и краткосрочные колебания в процессе образования взвеси и давать реальное представление об объемах ее поступления, в связи с чем наиболее актуально использование автоматизированных гидрохимических датчиков, которые в режиме реального времени передают информацию о состоянии водных объектов. Дополнительно могут быть использованы данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющие пространственно оценивать распространение взвеси одновременно на большой территории, включая труднодоступные участки.

Целью данного исследования являлось изучение зоны смешения речных и кислых шахтных вод, образующейся взвеси и техногенных минералов, а также их дальнейшая трансформация с учетом возможного негативного влияния на речные экосистемы.

Объект и методы исследования

Река Косьва, крупный левобережный приток Камского водохранилища, берет начало на западном склоне Среднего Урала. Общая длина реки 310 км, площадь водосборного бассейна 7485 км². В среднем течении р. Косьвы расположено Широковское водохранилище объемом 0,53 км³ [8, 9]. Для исследований был выбран участок ниже Широковского водохранилища, где р. Косьва пересекает Кизеловский угольный бассейн в широтном направлении. Выше Широковского водохранилища она практически не подвержена техногенному воздействию. Ниже Широковского водохранилища на водосборе р. Косьвы и ее прито-

ков расположены изливы шахтных вод, загрязненные родники и стоки с породных отвалов, являющиеся основными источниками негативного воздействия [8]. Поверхностные воды р. Косьвы в естественном состоянии в основном характеризуются $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ составом с минерализацией до 370 мг/дм³. В бассейне р. Косьвы существует 8 изливов КШВ, которые попадают непосредственно в реку или ее притоки (см. табл. 1). Шахтные воды характеризуются кислой реакцией среды (рН 2,3 – 2,9), сульфатным железисто-кальциевым составом с минерализацией до 13,3 г/дм³. Наиболее высокий уровень загрязнения характерен для изливов шахт имени Калинина и имени Крупской. Суммарно из всех изливов в год поступает до 14,7 млн м³ загрязненных вод, их объем во многом зависит от водности года [8].

Для выделения оптимального участка установки автоматизированного датчика в полевых условиях в зоне смешения в районе впадения излива кислых вод шахты имени Калинина в р. Косьву были опробованы 20 точек экспресс-анализаторами HI98129 Combo (Германия) и колориметром Hanna HI97721 (Германия) для определения рН, TDS (Total Dissolved Solids) и $\text{Fe}_{\text{общ}}$. Для получения данных о состоянии качества вод в выбранном участке установлен автоматизированный гидрохимический датчик, состоящий из двух графитовых электродов, измеряющих электропроводность, TDS, соленость и температуру.

Для изучения процессов техногенного минералообразования были отобраны пробы донных отложений в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 в устьях притоков и шахтных изливов и ниже их по течению р. Косьвы (см. рис. 1) и произведен анализ речных вод с использованием комбинированных анализаторов воды MAPK-302Э (Россия) и HI98129 Combo (Германия). Пробы донных отложений

Таблица 1

Химический состав изливов кислых шахтных вод, впадающих в р. Косву (2020 г.)
 Chemical composition of acid mine drainage flowing into the Kosva River (2020)

№	Источник загрязнения (см. рис. 1)	Дата отбора пробы	Объем излива, м ³ /сут	pH	Содержание основных элементов, мг/дм ³										Сумма микроэлементов, мг/дм ³
					SO ₄	Cl	HCO ₃	Ca	Mg	Na	Fe _{общ}	Al	Mn		
1	Излив шахты «Шумихинская»	13/05	96	3,9	3874	20	—*	204	72	5,2	1291	11	9,4	7,95	
		14/07	96	4,2	3601	10	—	192	92	5,3	1810	10	11	8,88	
		23/09	144	5,0	3811	10	6,1	257	58	4,6	1661	12	12	6,39	
2	Выход изливов шахты имени 40 лет Октября	07/05	144 000	6,3	76	20	24,5	25	6	1,1	838	0,66	0,3	5,13	
		28/07	48 408	6,5	213	10	81	63	13	2,1	0,91	0,82	0,62	5,46	
		08/10	31 200	5,9	224	10	25	63	12	1,9	3,5	0,36	0,85	6,27	
3	Излив из шахты имени Калинина	07/05	18 768	2,8	2710	20	—	176	65	13	732	28	6,3	21,88	
		22/07	21 888	2,9	3631	10	—	255	81	15	1015	37	11	25,36	
		20/08	18 000	3,1	3403	13	—	295	92	15	1161	33	10	23,69	
4	Излив из штольни шахты имени 1 Мая	07/05	3840	2,6	403	20	—	17	14	1,4	113	15	1,6	12,32	
		22/07	1752	2,6	690	10	—	20	19	1,3	82	14	2,5	13,56	
		20/08	936	2,5	421	10	—	23	22	1,4	84	15	2,3	13,61	
5	Излив из трубного хода шахты имени Крупской	30/04	1200	3,1	4587	20	—	163	81	31	1121	104	9,3	40,57	
		20/08	1992	3,5	4162	12	—	245	109	44	1570	90	13	33,23	
		14/09	168	3,5	4169	12	—	263	118	40	1835	94	16	34,80	
6	Разгрузка изливов шахты «Нагорная»	13/05	3600	6,4	79	20	29,3	24	2	0,71	2,6	3,5	0,22	5,88	
		14/07	1344	6,9	214	10	119	59	24	2,5	11	0,63	0,58	4,38	
		23/09	72	6,5	104	10	35	33	7	1,8	9,1	1,5	0,27	5,65	

* Ниже уровня обнаружения.

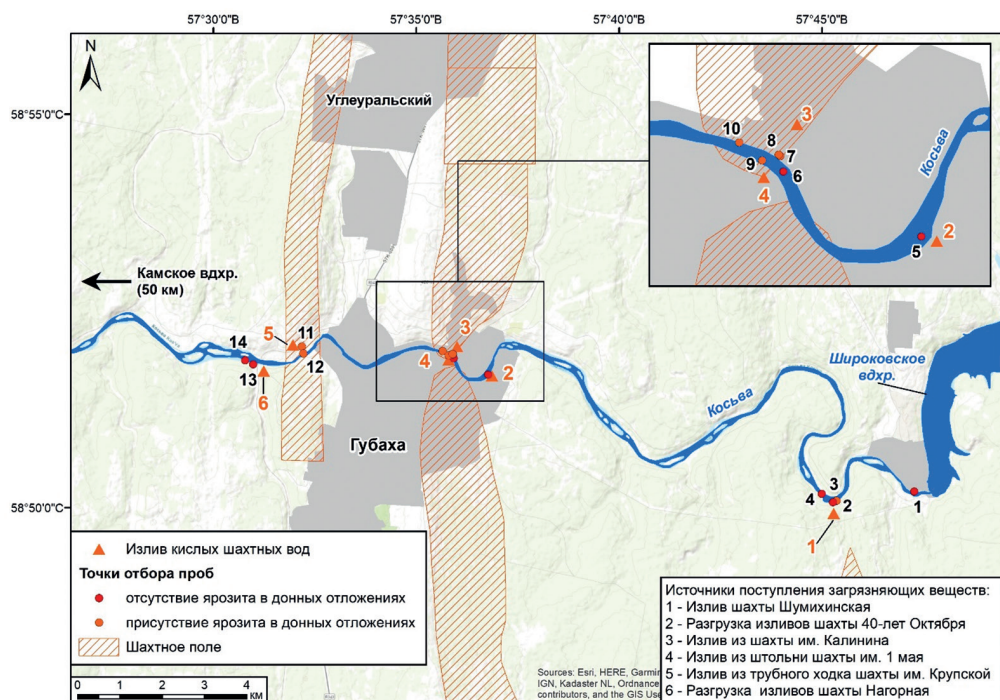


Рис. 1. Местоположение точек отбора проб и источники поступления загрязняющих веществ в бассейне р. Косьвы

Fig. 1. Locations of sampling points and sources of pollutants in the Kosva River basin

хранили в холодильнике и в течение суток транспортировали в лабораторию, где был проведен анализ их минералогического состава на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 Phaser («Bruker», США) и химического состава микронзондовым методом на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV («Jeol», Япония) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 («Oxford Instruments», Великобритания) в целом, а также анализ фракции донных отложений с размером частиц менее 0,01 мм, так как образующиеся при смешении кислых вод с речными железистые минералы имеют, как правило, небольшие размеры [10].

Результаты исследований и обсуждение

Поступление в р. Косьву кислых шахтных изливов приводит к снижению вели-

чины водородного показателя. При этом наблюдается рост электрической проводимости вод вследствие поступления в реку водорастворенных соединений в ионной форме. Водородный показатель и электрическая проводимость вод имеют тенденцию к восстановлению до начальных значений по мере удаления вниз по течению от участка впадения кислых шахтных вод, как вследствие разбавления водами р. Косьвы, так и в результате образования водонерастворимого техногенного осадка, отлагающегося на дне реки. Для выявления зоны активного образования техногенной взвеси и изменения pH детально изучена зона смешения при впадении излива кислых вод шахты имени Калинина в р. Косьву (см. рис. 1, т.о. № 3). По результатам определения pH, Fe_{общ} и TDS был выделен участок, где происходит наиболее динамичное изменение данных показателей.



Рис. 2. Зона смешения в районе впадения излива кислых вод шахты имени Калинина
 Fig. 2. Mixing zone in the area of the inflow of acid mine drainage of the Kalinin mine

Установлено, что этот участок представляет наибольший интерес для детальных режимных наблюдений с использованием гидрохимического датчика, выполняющего замеры в автоматизированном режиме (рис. 2). Помимо этого, излив шахты имени Калинина является одним из наиболее загрязненных и значительных по объему; это обуславливает формирование участка гидрохимической аномалии в р. Косье, что также фиксируется на спутниковых снимках.

В рамках исследований был выбран гидрохимический датчик, измеряющий несколько гидрохимических параметров. При этом значения TDS рассматривались как интегральный показатель уровня загрязнения водного объекта. Местоположение установленного датчика представ-

лено на рис. 2, замеры велись в летний и осенний период 2024 г. Данные передавались в автоматизированном режиме с заданным интервалом (каждые 30 мин). Диапазон изменения TDS составил от 28 ppт, фактически речные условия, до 1326 ppт. Первичная обработка данных выявила четкие зависимости колебания измеряемых параметров от гидродинамического режима р. Косьвы и изменений работы Широковской ГЭС (расположенной в 20 км выше по течению), что ранее не фиксировалось по данным традиционного мониторинга. В дальнейшем анализ изменения данного показателя позволит не только произвести качественный анализ формирующейся техногенной взвеси, но и выявить временные закономерности и дать ее коли-

Таблица 2

Результаты полевых исследований проб воды р. Косьвы (2020 г.)
Results of field studies of water samples of the Kosva River (2020)

Измеряемые параметры	Точки отбора проб воды													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH	7,3	5,4	4,0	5,9	6,3	6,6	6,3	6,5	4,2	6,4	3,5	6,7	6,6	6,6
TDS, ppm	35	523	2180	29	330	39	208	153	2540	42	4000	113	524	114

Таблица 3

Минеральный состав донных отложений, мас. %
Mineral composition of bottom sediments, wt. %

	Точки отбора проб донных отложений																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14									
	<0,01	<0,01	общ.**	<0,01	общ.	<0,01	общ.	<0,01	общ.	<0,01	общ.	<0,01	<0,01	<0,01									
Кварц	27,4	33,3	1,0	5,2	37,3	44,0	40,0	38,4	38,3	39,3	24,0	66,5	22,6	58,1	28,4	24,8	2,5	1,7	25,4	<0,01	<0,01	35,4	35,4
Плагиоклазы	9,4	12,1	0	2,9	11,5	13,9	10,9	9,7	12,6	6,3	7,1	1,9	1,3	3,4	5,4	4,2	1,0	4,3	4,4	4,4	12,1	12,0	
КПШ	9,2	10,1	21,2	9,8	12,8	10,8	10,9	13,8	12,0	5,7	6,7	2,8	7,0	5,7	5,5	3,1	19,4	1,9	11,5	11,5	10,4	10,4	
Слюда (гидрослюда)	25,2	15,6	10,9	5,6	14,9	5,0	11,1	12,4	10,3	6,0	14,5	11,3	23,5	11,5	22,7	24,6	13,1	7,0	22,5	17,3	17,3	17,7	
Хлорит	12,8	11,0	13,3	20,9	9,4	8,8	9,2	9,0	10,0	13,9	12,0	6,3	10,8	7,9	12,6	13,1	12,3	19,0	13,4	11,3	11,3	11,8	
Кальцит	3,5	1,4	1,3	1,5	1,2	0,7	1,3	1,2	0,8	1,5	2,0	1,7	1,9	1,8	3,0	3,1	14,8	1,9	1,7	1,2	1,2	1,2	
Доломит	2,0	0	0	0	0	1,1	2,4	1,6	2,3	2,1	0	0	0,5	0	0	0	1,2	3,4	0,9	0	0,9	0,9	
Ярозит	0	0	8,3	23,0	0	0	0	0	0	5,2	12,5	0	5,5	1,2	5,5	5,4	12,4	54,9	3,1	0	0	0	
Гематит	0,8	0,9	1,5	2,4	0,9	1,2	1,4	1,8	1,9	2,3	1,9	2,0	2,0	5,7	2,3	1,0	1,8	1,4	0	0,9	1,0	1,0	
Гётит	8,8	14,2	38,9	27,7	11,0	13,9	12,8	10,7	11,8	15,9	18,6	4,6	22,1	3,4	12,9	18,2	19,6	3,0	14,2	9,5	8,6	8,6	
Анаказ	0,9	1,4	2,2	0	1,0	0	0,8	0	1,8	0,7	1,9	2,8	1,3	1,3	2,5	2,5	1,9	0	2,9	0,8	1,0	1,0	
Пирит	0	0	1,4	1	0	0,6	0	0,6	0	0	0	1,0	0	0	0,4	0	0	1,5	0	0	0	0	
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

* Общее содержание минерала во фракции донных отложений с размером частиц менее 0,01 мм.

** Общее содержание минералов в донных отложениях.

Таблица 4

Химический состав донных отложений, мас. %
Chemical composition of bottom sediments, wt. %

	Точки отбора проб донных отложений																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14									
	общ. <0,01**	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01	общ. <0,01									
FeO*	86,55	84,65	82,30	84,22	17,41	77,54	5,47	63,45	19,50	67,82	30,86	28,10	71,20	78,50	83,37	45,39	12,12	9,33	73,94	11,76			
SO ₃	0,37	5,86	0,40	12,43	22,34	0,50	4,01	0,21	1,09	0,75	12,82	6,77	2,28	9,56	12,43	13,41	40,21	2,53	0,37	5,03	0,17		
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
V ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SiO ₂	7,91	61,08	3,72	58,87	0,71	1,70	54,97	5,34	65,57	16,94	66,30	3,51	42,46	31,51	13,14	3,63	0,44	1,23	58,81	56,99	6,33	58,09	
TiO ₂	—	0,52	—	0,72	—	—	0,94	—	0,12	—	0,18	0,28	0,26	0,86	0,20	0,11	—	—	0,40	0,30	—	0,55	
Al ₂ O ₃	1,51	20,09	2,56	21,07	2,72	1,88	17,50	8,72	17,61	8,68	7,84	10,59	10,87	18,31	3,98	1,54	0,51	0,87	18,06	21,15	8,36	19,22	
CaO	1,62	1,59	0,68	0,92	0,07	0,71	1,43	1,02	2,66	2,23	1,17	0,15	0,63	10,65	—	—	—	0,10	0,84	1,57	1,55	1,49	
MgO	0,29	2,53	—	1,26	—	—	1,58	0,48	0,51	0,86	0,72	2,07	1,12	1,54	0,46	—	0,14	0,11	2,84	4,13	0,25	2,76	
MnO	—	0,15	—	0,12	—	—	0,11	0,11	0,03	0,10	—	—	—	0,11	—	—	—	—	0,14	0,06	0,33	0,11	
Na ₂ O	—	1,61	—	3,98	—	—	0,35	—	4,93	—	0,10	—	0,38	0,61	—	—	—	—	1,02	0,33	0,52	—	0,75
K ₂ O	—	3,21	—	1,69	0,95	4,98	2,01	—	1,08	0,81	0,38	0,97	3,72	1,52	0,83	1,03	0,99	7,78	1,61	2,25	0,16	2,61	
Cu	0,41	0,87	0,80	0,83	0,48	1,47	0,98	1,05	0,66	1,51	1,05	0,64	1,07	1,12	0,16	1,17	0,42	1,24	0,76	0,95	1,67	0,83	
Zn	0,44	1,19	0,91	0,79	0,43	1,68	1,03	0,85	0,57	1,33	1,16	0,53	0,98	1,60	0,17	0,84	0,27	1,24	1,04	1,19	1,40	0,83	
Co	0,33	0,06	0,24	—	0,22	0,20	0,05	0,32	—	0,24	0,05	0,31	0,10	0,05	0,16	0,20	0,17	0,15	0,06	0,05	0,18	0,07	
Ni	0,11	—	0,06	—	—	—	—	—	0,02	—	—	0,08	—	—	—	—	0,08	—	—	0,06	—	0,04	
As	—	—	—	0,05	—	—	—	—	—	—	—	0,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Sb	0,11	—	—	—	—	—	0,10	—	0,16	—	0,10	—	—	0,30	—	—	—	—	—	—	—	—	
Bi	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Cl	—	—	—	—	—	—	0,06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

* Общее содержание химических элементов (в виде их оксидов) в донных отложениях.

** Общее содержание химических элементов (в виде их оксидов) во фракции донных отложений с размером частиц менее 0,01 мм.

*** Ниже уровня обнаружения.

ческие характеристики, что позволяет рассчитать объем техногенного осадка, ежегодно поступающего в речную сеть.

Результаты полевых исследований вод р. Косьвы в устьях притоков и шахтных изливов и ниже их по течению представлены в табл. 2. Минеральный состав донных отложений в целом и их фракции с размером частиц менее 0,01 мм показан в табл. 3, химический состав — в табл. 4.

Согласно [10], новообразованная техногенная взвесь, а далее осадок, при значениях водородного показателя более 5,0 представлен в основном рентгеноаморфным гидроксидом трехвалентного железа. Дифрактограммы исследованных образцов донных отложений имеют повышенный фон, что свидетельствует о присутствии в донных отложениях рентгеноаморфной фазы минералов.

Результаты рентгенодифракционного анализа показали, что донные отложения содержат следующие железосодержащие минералы: ярозит ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$), гематит (Fe_2O_3), гетит ($FeOOH$), пирит (FeS_2), которые суммарно составляют от 8 до 50% всех минералов отложений. Гематит в донных отложениях обнаруживался практически повсеместно, а пирит — только в устьях изливов шахтных вод (шахты «Шумихинская», штольни шахты имени Крупской, шахты «Нагорная») или ниже их по течению (Излив шахты имени Калинина, имеющий наибольший дебит из всех изливов). Гематит и пирит являются распространенными минералами породных отвалов, которые складированы по берегам р. Косьвы на значительном протяжении и интенсивно размываются во время паводка. Гематит и пирит могут обнаруживаться в составе донных отложений в результате их переноса течением вод и последующего осаждения, в том числе вместе с новооб-

разованным осадком [8]. Показана также возможность образования кристаллов гематита из агрегированных частиц аморфного гидроксида трехвалентного железа [11, 12]. Некоторые исследователи отмечают возможность новообразования кристаллов пирита в железосодержащих пресноводных донных отложениях в присутствии сульфат-ионов в результате жизнедеятельности микроорганизмов этих отложений [13, 14].

Минерал гетит образуется в водотоках в широких пределах pH [15], он менее растворим, чем аморфный гидроксид трехвалентного железа, и всегда находится в пересыщенном состоянии в растворах с низкой температурой (Murad, Rojik, 2005), а также может соосаждаться вместе с другими слабокристаллическими железосодержащими компонентами [16] и со временем переходить в более стабильную фазу — кристаллического гетита [17]. В донных отложениях р. Косьвы содержание гетита составляло до 92% от всех железосодержащих минералов. При этом во фракции с размером частиц менее 0,01 мм фоновой пробы у Широковского водохранилища (т.о. № 1) его содержание было 8,8% от содержания всех минералов, в пробах; отобранных в устьях впадения кислых вод, содержание гетита в этой же фракции достигало 27,7% (т.о. № 3), а в пробах, отобранных ниже впадения кислых вод, содержание гетита во фракции с размером частиц менее 0,01 мм снижалось до 22,1% (т.о. № 8), что, по нашему мнению, является доказательством того, что обнаруживаемый в донных отложениях гетит имеет техногенное происхождение и образуется в результате смешения кислых железосодержащих вод с водами р. Косьвы.

Анализ минерального состава донных отложений фракции с размером частиц менее 0,01 мм показал, что данная фракция была представлена преимуще-

Таблица 5

Классификация донных отложений по преобладающим элементам и минералам
Classification of bottom sediments by predominant elements and minerals

Группа донных отложений	Преобладающий химический элемент, представленный в виде его оксида	Содержание элемента, %	Преобладающие минералы	Точка отбора, участок реки
Сернисто-железистая	SO ₃	более 12	ярозит	3 – устье излива шахты «Шумихинская», 7 – устье излива шахты имени Калинина, 10 – ниже излива шахты имени 1 Мая, 11 – устье излива шахты имени Крупской
Железистая	SO ₃	4–9,5	ярозит, глинистые минералы	2 – устье р. Шумиха, 5 – устье изливов шахты имени 40 лет Октября, 9 – устье излива шахты имени 1 Мая, 14 – ниже изливов шахты «Нагорная»
Кремнеземисто-железистая	SiO ₂	более 13	глинистые минералы	1 – фоновая проба, 4 – ниже излива шахты «Шумихинская», 6 – ниже изливов шахты имени 40 лет Октября
Глиноземисто-железистая	Al ₂ O ₃	более 8	глинистые минералы	8 – ниже излива шахты имени Калинина, 12 – ниже излива шахты имени Крупской, 13 – устье изливов шахты «Нагорная»

Таблица 6

Минеральные типы фракции донных отложений с размером частиц менее 0,01 мм
Mineral types of bottom sediments (particles fraction less 0.01 mm)

Минеральный тип	Характерные оксиды	Точка отбора, участок реки
Ярозитовый	SO ₃ , Fe ₂ O ₃ , K ₂ O	3 – устье излива шахты «Шумихинская», 11 – устье излива шахты имени Крупской
Ярозитово-глинистый	преобладают SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , присутствуют SO ₃ , Fe ₂ O ₃ , K ₂ O	7 – устье излива шахты имени Калинина, 8 – ниже излива шахты имени Калинина, 12 – ниже излива шахты имени Крупской
Полевошпатовый	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Na ₂ O	2 – устье р. Шумиха, 5 – устье изливов шахты имени 40 лет Октября
Хлоритовый	высокое содержание MgO, присутствуют Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃	13 – устье изливов шахты «Нагорная»
Кварцевый	значительное преобладание SiO ₂	6 – ниже изливов шахты имени 40 лет Октября
Гидро-слиудистый	Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃	1 – фоновая проба, 4 – ниже излива шахты «Шумихинская», 9 – устье излива шахты имени 1 Мая, 10 – ниже излива шахты имени 1 Мая, 14 – ниже изливов шахты «Нагорная»

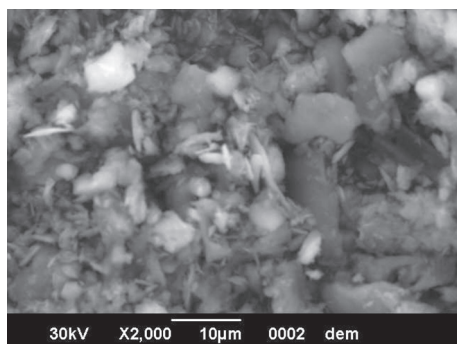


Рис. 3. Электронно-микроскопический снимок донных отложений в фоновой точке отбора (т.о. № 1)

Fig. 3. SEM photo of bottom sediments at the background sampling point (No. 1)

ственно кварцем, гидрослюдой, плагиоклазами, калиевым полевым шпатом, хлоритом и гетитом, в небольшом количестве присутствовали кальцит, доломит, гематит, анатаз. В устьях изливов шахт «Шумихинская», имени Калинина, имени 1 Мая и имени Крупской и ниже их по течению в этой фракции обнаруживался ярозит в количестве от 3 до 55%. По данным [8], ярозит является распространенным минералом шахтных отвалов. Известно, что при значениях pH 2,3–5,0 железосодержащие компоненты могут выпадать в осадок в форме ярозита [10]. В нашем исследовании ярозит обнаруживался только в донных отложениях, отобранных в устьях изливов шахт и ниже их по течению. Отсутствие ярозита в донных отложениях, отобранных в устьях притоков р. Косьвы, дренирующих территории расположения породных отвалов (т.о. № 2, 5, 13), может свидетельствовать в пользу того, что ярозит не является принесенным течением рек с отвалов, а образуется непосредственно в результате смешения шахтных вод с водами р. Косьвы. На рис. 3 и 4 приведены электронно-микроскопические снимки образцов донных отложений фоновой пробы (т.о. № 1) и пробы, содержащей ярозит (т.о. № 11),

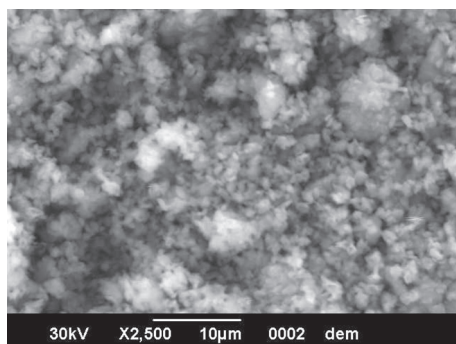


Рис. 4. Электронно-микроскопический снимок донных отложений после впадения излива шахты имени Крупской (т.о. № 11)

Fig. 4. SEM photo of bottom sediments from sampling point No. 11

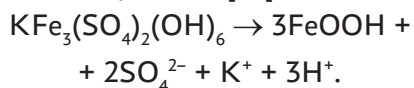
для которой характерны значительно более мелкие по размерам частицы и агрегаты.

По результатам микрозондового анализа донные отложения р. Косьвы можно разделить на следующие группы по характерным химическим элементам и преобладающим минеральным компонентам, которые представлены в табл. 5.

По результатам микрозондового анализа фракцию донных отложений с размером частиц до 0,01 мм можно разделить на минеральные типы, которые представлены в табл. 6.

Результаты микрозондового анализа показали, что донные отложения в целом и их фракция с размером частиц до 0,01 мм содержали микроэлементы: медь — до 1,7 и до 1,5%, цинк — до 1,4 и до 1,7%, кобальт — до 0,3 и до 0,2%, соответственно. В отдельных пробах обнаруживались никель (до 0,1%), мышьяк (до 0,2%), сурьма (до 0,3%), висмут (0,2% — в одной пробе). Известно, что техногенный осадок, образующийся в зоне смешения кислых шахтных вод с речными, сорбирует из воды микроэлементы [18], при этом переход микроэлементов из раствора в фазу осадка усиливается с ростом водородного показателя [19]. В качестве сорбентов мик-

роэлементов выступают железосодержащие минералы [19–21], которые со временем трансформируются в гетит, как наиболее устойчивый в условиях гипергенеза [22]. Например, трансформации ярозита в гетит способствуют нейтральные условия среды, в зависимости от других условий она занимает от нескольких месяцев до нескольких лет и протекает в соответствии со следующим уравнением реакции [23]:



Так как трансформация железосодержащих минералов протекает через фазу их растворения, то возможно высвобождение в раствор адсорбированных на минералах химических элементов [10]. При этом образующийся гетит также обладает адсорбционными свойствами, однако они значительно ниже, чем у трансформирующихся минералов [24]. Кроме того, возможно растворение железосодержащих минералов техногенного осадка микроорганизмами, что будет сопровождаться мобилизацией и транспортом вниз по течению реки ионов железа, сульфат-ионов и ассоциированных с осадком микроэлементов [10].

Установлено, что техногенные железосодержащие минералы донных отложений, накопившиеся в результате поступления в речные воды изливов кислых шахтных вод, сорбируют большинство микроэлементов, таких как медь, цинк, кобальт, никель и др. В сравнении с фоновой пробой в донных отложениях, подверженных влиянию КШВ, содержание железосодержащих минералов значительно выше. Соответственно, адсорбированные в техногенных донных отложениях микроэлементы могут высвобождаться в раствор и являться потенциальным источником вторичного загрязнения вод как самой р. Косьвы, так и Камского водохранилища.

Заключение

Типоморфными минералами, образующимися при смешении кислых шахтных вод изливов Кизеловского угольного бассейна с водами р. Косьвы, являются ярозит и гетит. В донных отложениях р. Косьвы содержание гетита составляет до 92% от всех железосодержащих минералов, содержание ярозита во фракции с размером частиц до 0,01 мм могло достигать 55% от всех минералов. Гетит образуется в достаточно широких пределах pH и обнаруживается практически повсеместно, в то же время ярозит в донных отложениях р. Косьвы обнаруживается только в устьях изливов шахт и ниже их по течению на больших расстояниях.

Выпадающие в осадок при смешении шахтных вод с речными железистые минералы могут являться сорбентами микроэлементов, обнаруживаемых в шахтных водах. Наиболее интересной зоной для изучения формирования техногенной взвеси является район разлива шахты имени Калинина, здесь, по данным экспресс-анализов и космических снимков, образовался участок гидрохимической аномалии. Установка гидрохимических датчиков в данной области позволила выявить временные закономерности и в дальнейшем определить количественные характеристики ее образования. Функционирование датчиков в течение более длительного периода позволит расширить охват данных о гидрохимическом состоянии объектов.

Современен происходит трансформация всех железосодержащих минералов в гетит. Так как трансформация минералов протекает через фазу их растворения, а образующийся в результате трансформации гетит обладает меньшими адсорбционными свойствами, чем исходные минералы, то адсорбированные микроэлементы могут высвобождаться в раствор и вновь загрязнять речные

воды. Таким образом, техногенные железосодержащие минералы донных отложений являются потенциальным источником вторичного загрязнения вод р. Косьвы и Камского водохранилища,

а дальнейшее изучение образования техногенной взвеси при помощи современных методов мониторинга является необходимым для количественной оценки поступающих загрязняющих веществ.

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. Бурмистров А. А., Самсонов А. А., Тельнов А. Е. Эколого-экономические аспекты разработки природных и связанных с ними техногенных рудных месторождений на примере Джидинского вольфрамо-молибденового комбината, Республика Бурятия // *Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология*. – 2024. – № 2. – С. 54 – 64. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-54-64.

3. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Оценка эффективности очистки кислых шахтных вод (на примере медноколчеданных рудников Среднего Урала) // *Записки Горного института*. – 2024. – Т. 267. – С. 388 – 401.

4. Abramov S. M., Tejada J., Grimm L., Schädler F., Bulaev A., Tomaszewski E. J., Byrne J. M., Straub D., Thorwarth H., Amils R., Kleindienst S., Kappler A. Role of biogenic Fe (III) minerals as a sink and carrier of heavy metals in the Rio Tinto, Spain // *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 718, article 137294. DOI: 10.1128/aem.02290-21.

5. Фетисова Н. Ф. Исследование форм миграции металлов в реках, подверженных влиянию шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – № 1. – С. 144 – 152. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.

6. Broshears R. E., Runkel R. L., Kimball B. A., McKnight D. M., Bencala K. E. Reactive solute transport in an acidic stream: experimental pH increase and simulation of controls on pH, aluminum, and iron // *Environmental Science & Technology*. 1996, vol. 30, no. 10, pp. 3016 – 3024.

7. Максимович Н. Г., Пьянков С. В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. – Пермь: ПГНИУ, 2018. – 288 с.

8. 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.

9. Kupka D., Pállová Z., Horňáková A., Achimovičová M., Kavečanský V. Effluent water quality and the ochre deposit characteristics of the abandoned Smolník mine // *East Slovakia. Acta Montanistica Slovaca*. 2012, vol. 17, no. 1, pp. 56 – 64.

10. Fischer W., Schwertmann U. The formation of hematite from amorphous iron (III) hydroxide // *Clays and Clay Minerals*. 1975, vol. 23, pp. 33 – 37.

11. Supattarasakda K., Petcharoen K., Permpool T., Sirivat A., Lerdwijitjarud W. Control of hematite nanoparticle size and shape by the chemical precipitation method // *Powder Technology*. 2013, vol. 249, pp. 353 – 359.

12. Ивашов П. В. Геохимия и термодинамика эпигенетического процесса образования пиритовых конкреций // *Биогеохимия зоны гипергенеза: сборник научных статей*. – М., 1971. – С. 3 – 29.

13. Peiffer S. The reaction of hydrogen sulphide with ferric oxides – some conceptual ideas on its significance for sediment – water interactions // *Environmental Chemistry of Lakes and Reservoirs. ACS Advances in Chemistry Series*. 1994, vol. 237, pp. 371 – 390.

14. Lee J.-E., Kim Y. A quantitative estimation of the factors affecting pH changes using simple geochemical data from acid mine drainage // *Environmental Geology*. 2008, vol. 55, no. 1, pp. 65 – 75. DOI: 10.1007/s00254-007-0965-6.

15. Yu J. Y., Heo B., Choi I., Cho J., Chang H. Apparent solubilities of schwertmannite and ferrihydrite in natural stream waters polluted by mine drainage // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999, vol. 63, no. 19/20, pp. 3407 – 3416.
16. Da Silva E. F., Patinha C., Reis P., Fonseca E. C., Matos J. X., Barrosinho J., Oliveira J. M. S. Interaction of acid mine drainage with waters and sediments at the Corona stream, Lousal mine (Iberian Pyrite Belt, Southern Portugal) // *Environmental Geology*. 2006, vol. 50, no. 7, pp. 1001 – 1013. DOI: 10.1007/s00254-006-0273-6.
17. 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.
18. Sánchez-España J., López-Pamo E., Santofimia E. P., de Andrés J.-R., Martín-Rubi J.-A. The removal of dissolved metals by hydroxysulphate precipitates during oxidation and neutralization of acid mine waters, Iberian Pyrite Belt // *Aquatic Geochemistry*. 2006, vol. 12, no. 3, pp. 269 – 298. DOI: 10.1007/s10498-005-6246-7.
19. Paulson J. A., Balistrieri L. Modeling removal of Cd, Cu, Pb, and Zn in acidic groundwater during neutralization by ambient surface waters and groundwaters // *Environmental Science & Technology*. 1999, vol. 33, no. 21, pp. 3850 – 3856.
20. Zhao H., Xia B., Qin J., Zhang J. Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage. A case study in Dabaoshan Mine, China // *Journal of Environmental Sciences*. 2012, vol. 24, no. 6, pp. 979 – 989. DOI: 10.1016/S1001-0742(11)60868-1.
21. Hammarstrom J. M., Seal R. R., Meier A. L., Kornfeld J. M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments // *Chemical Geology*. 2005, vol. 215, no. 1 – 4, pp. 407 – 431. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.053.
22. Murad E., Rojik P. Iron mineralogy of mine-drainage precipitates as environmental indicators: review of current concepts and a case study from the Sokolov Basin, Czech Republic // *Clay Minerals*. 2005, vol. 40, no. 4, pp. 427 – 440. DOI: 10.1180/0009855054040181.
23. Bigham J. M., Schwertmann U., Traina S. J., Winland R. L., Wolf M. Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996, vol. 60, no. 12, pp. 2111 – 2121. DOI: 10.1016/0016-7037(96)00091-9. **PLAS**

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. Burmistrov A. A., Samsonov A. A., Tel'nov A. E. Ecological and economic aspects of the development of natural and related man-made ore deposits on the example of the Dzhidinsky tungsten-molybdenum plant, Republic of Buryatia. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2024, no. 2, pp. 54 – 64. [In Russ]. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-54-64.
3. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. U. Evaluation of the efficiency of acid mine water purification (using the example of copper pyrite mines of the Middle Urals). *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 267, pp. 388 – 401. [In Russ].
4. Abramov S. M., Tejada J., Grimm L., Schädler F., Bulaev A., Tomaszewski E. J., Byrne J. M., Straub D., Thorwarth H., Amils R., Kleindienst S., Kappler A. Role of biogenic Fe (III) minerals as a sink and carrier of heavy metals in the Rio Tinto, Spain. *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 718, article 137294. DOI: 10.1128/aem.02290-21.
5. 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, no. 1, pp. 144 – 152. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.
6. Broshears R. E., Runkel R. L., Kimball B. A., McKnight D. M., Bencala K. E. Reactive solute transport in an acidic stream: experimental pH increase and simulation of controls on pH, aluminum, and iron. *Environmental Science & Technology*. 1996, vol. 30, no. 10, pp. 3016 – 3024.
7. Maksimovich N. G., P'yankov S. V. *Kizelovskiy ugol'niy basseyn: ekologicheskie problemy i puti resheniya* [Kizel coal basin: environmental problems and solutions], Perm, PGNIU, 2018, 288 p.
8. 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*.

Geo Assets Engineering. 2022, vol. 333, no. 7, pp. 64–75. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3482.

9. Kupka D., Pállová Z., Horňáková A., Achimovičová M., Kavečanský V. Effluent water quality and the ochre deposit characteristics of the abandoned Smolník mine. *East Slovakia. Acta Montanistica Slovaca*. 2012, vol. 17, no. 1, pp. 56–64.

10. Fischer W., Schwertmann U. The formation of hematite from amorphous iron (III) hydroxide. *Clays and Clay Minerals*. 1975, vol. 23, pp. 33–37.

11. Supattarasakda K., Petcharoen K., Permpool T., Sirivat A., Lerdwijitjarud W. Control of hematite nanoparticle size and shape by the chemical precipitation method. *Powder Technology*. 2013, vol. 249, pp. 353–359.

12. Ivashov P. V. Geochemistry and thermodynamics of the epigenetic process of formation of pyrite nodules. *Biogekhimiya zony gipergenezha: sbornik nauchnykh statey* [Biogeochemistry of the hypergenesis zone: collection of scientific articles], Moscow, 1971, pp. 3–29.

13. Peiffer S. The reaction of hydrogen sulphide with ferric oxides – some conceptual ideas on its significance for sediment–water interactions. *Environmental Chemistry of Lakes and Reservoirs. ACS Advances in Chemistry Series*. 1994, vol. 237, pp. 371–390.

14. Lee J.-E., Kim Y. A quantitative estimation of the factors affecting pH changes using simple geochemical data from acid mine drainage. *Environmental Geology*. 2008, vol. 55, no. 1, pp. 65–75. DOI: 10.1007/s00254-007-0965-6.

15. Yu J. Y., Heo B., Choi I., Cho J., Chang H. Apparent solubilities of schwertmannite and ferrihydrite in natural stream waters polluted by mine drainage. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999, vol. 63, no. 19/20, pp. 3407–3416.

16. Da Silva E. F., Patinha C., Reis P., Fonseca E. C., Matos J. X., Barrosinho J., Oliveira J. M. S. Interaction of acid mine drainage with waters and sediments at the Corona stream, Lousal mine (Iberian Pyrite Belt, Southern Portugal). *Environmental Geology*. 2006, vol. 50, no. 7, pp. 1001–1013. DOI: 10.1007/s00254-006-0273-6.

17. 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.

18. Sánchez-España J., López-Pamo E., Santofimia E. P., de Andrés J.-R., Martín-Rubi J.-A. The removal of dissolved metals by hydroxysulphate precipitates during oxidation and neutralization of acid mine waters, Iberian Pyrite Belt. *Aquatic Geochemistry*. 2006, vol. 12, no. 3, pp. 269–298. DOI: 10.1007/s10498-005-6246-7.

19. Paulson J. A., Balistrieri L. Modeling removal of Cd, Cu, Pb, and Zn in acidic groundwater during neutralization by ambient surface waters and groundwaters. *Environmental Science & Technology*. 1999, vol. 33, no. 21, pp. 3850–3856.

20. Zhao H., Xia B., Qin J., Zhang J. Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage. A case study in Dabaoshan Mine, China. *Journal of Environmental Sciences*. 2012, vol. 24, no. 6, pp. 979–989. DOI: 10.1016/S1001-0742(11)60868-1.

21. Hammarstrom J. M., Seal R. R., Meier A. L., Kornfeld J. M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology*. 2005, vol. 215, no. 1–4, pp. 407–431. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.053.

22. Murad E., Rojik P. Iron mineralogy of mine-drainage precipitates as environmental indicators: review of current concepts and a case study from the Sokolov Basin, Czech Republic. *Clay Minerals*. 2005, vol. 40, no. 4, pp. 427–440. DOI: 10.1180/0009855054040181.

23. Bigham J. M., Schwertmann U., Traina S. J., Winland R. L., Wolf M. Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996, vol. 60, no. 12, pp. 2111–2121. DOI: 10.1016/0016-7037(96)00091-9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Максимович Николай Георгиевич¹ – канд. геол.-минерал. наук, доцент, Заслуженный эколог РФ, заместитель директора по научной работе Естественнонаучного института, e-mail: nmax@psu.ru, ORCID ID: 0000-0001-6220-2730,

*Деменев Артем Дмитриевич*¹ – канд. геол.-минерал. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: demenevartem@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-1086-178X,

*Хмурчик Вадим Тарасович*¹ – д-р геол.-минерал. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: khmurchik.vadim@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7629-6168,

*Березина Ольга Алексеевна*¹ – канд. геогр. наук,
доцент, e-mail: berezina.olga16@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-6491-0722,

*Мизёв Артем Александрович*¹ – студент магистратуры,
e-mail: artem.mizev@bk.ru,
ORCID ID: 0009-0008-0069-1207,

¹ Пермский государственный национальный
исследовательский университет (ПГНИУ)

Для контактов: Березина О.А., e-mail: berezina.olga16@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*N.G. Maksimovich*¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Assistant Professor, Honored Ecologist of Russian Federation,
Deputy Director for Scientific Work

at the Natural Science Institute, e-mail: nmax@psu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6220-2730,

*A.D. Demenev*¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Senior Researcher, e-mail: demenevartem@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-1086-178X,

*V.T. Khmurchik*¹, Dr. Sci. (Geol. Mineral.),
Leading Researcher, e-mail: khmurchik.vadim@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7629-6168,

*O.A. Berezina*¹, Cand. Sci. (Geogr.), Assistant Professor,
e-mail: berezina.olga16@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-6491-0722,

*A.A. Mizev*¹, Master's Student,
e-mail: artem.mizev@bk.ru,
ORCID ID: 0009-0008-0069-1207,

¹ Perm State National Research University, Perm, 614068, Russia.

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

Получена редакцией 30.09.2024; получена после рецензии 20.01.2025; принята к печати 10.03.2025.

Received by the editors 30.09.2024; received after the review 20.01.2025; accepted for printing 10.03.2025.

