

## ФОРМЫ ПЕРЕНОСА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РЕЧНОЙ СЕТИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ВО ФРАКЦИЯХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНАХ УГЛЕДОБЫЧИ

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

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

**Аннотация:** Разработка угольных месторождений шахтным способом зачастую 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 их попадании в речную сеть происходит нейтрализация и выпадение осадка гидроксидов металлов, на котором сорбируется большинство микроэлементов. Исследования проводились на р. Косье (Западный Урал, Россия), в которую поступают кислые воды восьми изливов Кизеловского угольного бассейна, характеризующиеся сульфатным железисто-кальциевым составом и высокой минерализацией. Задачами исследования являлись оценка масштабов образования взвеси техногенного происхождения расчетным методом по данным химического анализа воды, определение форм переноса микроэлементов в речной воде, распределение микроэлементов в системе «вода–донные отложения» и в разных химических фракциях донных отложений, ICP-MS анализом воды и экстрактов донных отложений. Основными формами переноса микроэлементов являются водорастворенная и коллоидная формы. Основное содержание микроэлементов в донных отложениях приходилось на фракцию консолидированного органического вещества, оксидов и сульфидов, а также фракцию твердого остаточного вещества. По степени подвижности в системе «вода–донные отложения» микроэлементы располагаются в следующем порядке:  $Mn > Co > Ni > Zn \approx Mn > Li > Cu > Al \approx Cr$ . Накопившиеся в русле техногенные отложения могут являться источником вторичного загрязнения вод реки микроэлементами в случае изменения условий окружающей среды.

**Ключевые слова:** угольный бассейн, кислые шахтные воды, микроэлементы, речные системы, техногенные донные отложения, загрязнение поверхностных вод, окружающая среда, сорбция.

**Благодарность:** Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2021 г.

**Для цитирования:** 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.

---

## Forms of transfer of microelements in river network and their distribution in bottom sediments in coal mining regions

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

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

---

**Abstract:** Underground coal mining often produces acid water with high content of microelements. In closure of coal mines using flooding, after recovery of groundwater level, acid mine water can flow out on ground surface. Such water enters a river network and gets neutralized, and sediments of metal hydroxides settle and accumulate many microelements. The studies were carried out at the Kosva River, Western Ural, Russia, which intakes acid water from eight outlets in the Kizel Coal Basin, having sulfate ferruginous–calcium composition and high mineralization. The research objectives were calculation of manmade suspended matter size and spread from them chemical analysis of water, determination of transfer mechanisms of microelements in river water, and identification of distribution of microelements in the water–bottom sediment system and per chemical fractions of bottom sediments by ICP-MS analysis of water and bottom sediment extracts. Microelements mostly transfer in dissolved and colloidal forms. The highest content of microelements in bottom sediments is observed in the fraction of consolidated organic matter, oxides and sulfides and in the fraction of solid residual compound. With respect to the rate of mobility in the water–bottom sediment system, microelements range as follows:  $Mn > Co > Ni > Zn \approx Mn > Li > Cu > Al \approx Cr$ . The manmade sediments accumulated on river bed are the source of the secondary water pollution with microelements in the changing environment.

**Key words:** coal basin, acid mine water, microelements, river systems, manmade bottom sediments, surface water pollution, environment, sorption.

**Acknowledgements:** The studies were supported by the Perm Research and Education Center for Rational Subsoil Management, 2021.

**For citation:** 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;(11):52-66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_52.

---

### Введение

Негативное влияние кислых шахтных вод (КШВ) и стоков породных отвалов на поверхностные и подземные воды наблюдается 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 [4–6]. Так же поверхностные воды содержат взвесь естествен-

ного происхождения, на которой также могут сорбироваться микроэлементы. Взвесь, представленная частицами коллоидных размеров и металлы, оставшиеся в растворенной форме, переносятся течением водотоков на значительное расстояние [7, 8]. Агрегация частиц взвеси приводит к образованию более крупных частиц, которые легче осаждаются [9]. Осаждение взвешенных частиц приводит к тому, что дно водотоков покрывается слоем техногенных отложений, распределение которых неравномерно по дли-

не реки: максимальное накопление происходит на участки с минимальными скоростями течения — плесы и заливы. Образовавшиеся техногенные донные отложения могут являться источником вторичного загрязнения, так как в них содержится до 99% всех микроэлементов, поступивших в водоток [4, 10, 11].

Исследования выполнены на примере р. Косьвы, протекающей по территории Кизеловского угольного бассейна (КУБ), расположенного на склонах Западного Урала (Россия). Территория бассейна подвержена постоянному негативному воздействию кислых шахтных вод. При их попадании в природные воды

происходит образование взвеси, представленной в основном аморфными гидроксидами железа и алюминия с высоким содержанием Mn, Cu, Ni, Zn, Pb и др. [8]. Основной зоной аккумуляции техногенного осадка является Косьвинский залив Камского водохранилища. Задачами данного исследования являлись оценка масштабов образования в водах р. Косьвы взвеси техногенного происхождения, определение содержания микроэлементов в составе разных форм их переноса, а также определение содержания микроэлементов в составе разных химических фракций техногенных донных отложений.

Таблица 1

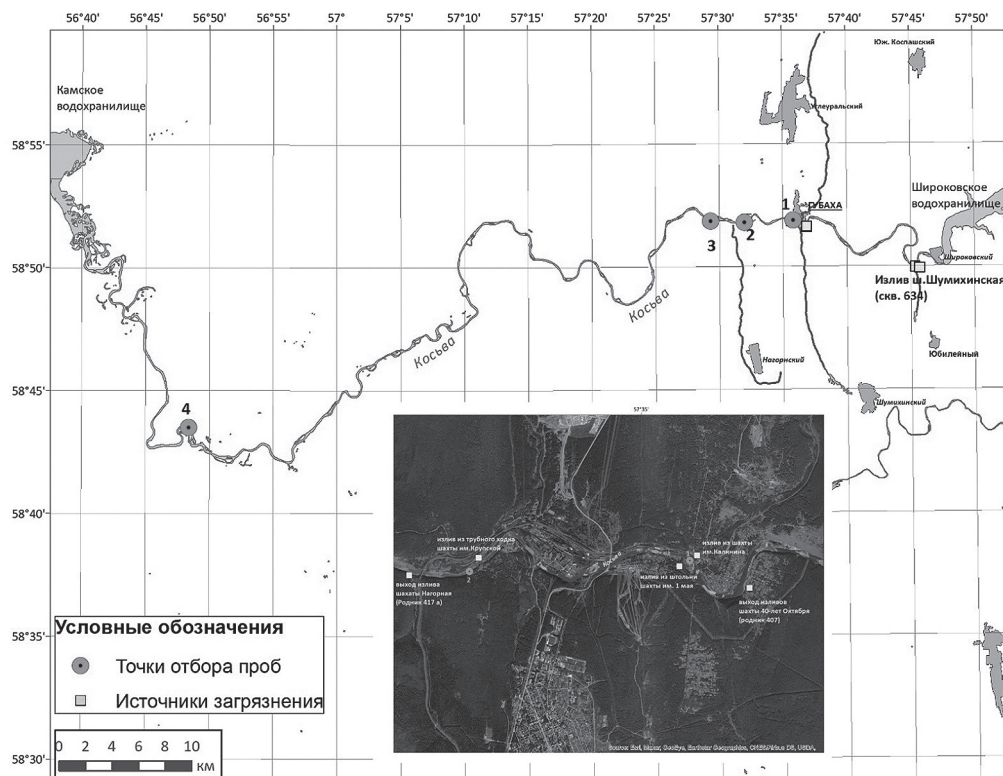
**Характеристика основных источников загрязнения р. Косьвы в весенне-осенний период 2020 г. по данным [13]**  
**Characteristics of major pollution sources at the Kosva River in spring–winter of 2020 by data [13]**

№ п/п	Источник загрязнения	Дата опробования	рН	Содержание элементов, мг/дм <sup>3</sup>			Дебет, м <sup>3</sup> /сут
				Fe <sub>общ</sub>	Al	Mn	
1	Излив шахты Шумихинская (скв. 634)	13/05	3,9	1291	11	9,4	96
		14/07	4,2	1810	10	11	96
		23/09	5	1661	12	12	144
2	Выход изливов шахты 40-лет Октября (Родник 407)	07/05	6,3	8,38	0,66	0,3	144 000
		28/07	6,5	0,91	0,82	0,62	48 408
		08/10	5,9	3,5	0,36	0,85	31 200
3	Излив из шахты им. Калинина	07/05	2,8	732	28	6,3	18 768
		22/07	2,9	1015	37	11	21 888
		20/08	3,1	1161	33	10	18 000
4	Излив из штольни шахты им. 1 мая	07/05	2,6	113	15	1,6	3840
		22/07	2,6	82	14	2,5	1752
		20/08	2,5	84	15	2,3	936
5	Излив из трубного ходка шахты им. Крупской	30/04	3,1	1121	104	9,3	1200
		20/08	3,5	1570	90	13	1992
		14/09	3,5	1835	94	16	168
6	Выход изливов шахты Нагорная (Родник 417а)	13/05	6,4	2,6	3,5	0,22	3600
		14/07	6,9	11	0,63	0,58	1344
		23/09	6,5	9,1	1,5	0,27	72

### Объект исследования

Река Косьва (Пермский край) — крупный левобережный приток Камского водохранилища, берущий начало на западном склоне Среднего Урала. Общая длина реки 283 км, уклон изменяется от 3 до 1,8%, площадь водосбора — 6300 км<sup>2</sup>. Годовая амплитуда колебания уровня воды составляет 248 см. Воды реки в естественном состоянии характеризуются гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевым составом с минерализацией до 120 мг/дм<sup>3</sup> [8]. В 1946 г. на реке создано Широковское водохранилище, что привело к изменению гидродинамического режима, а заполнение в 1954 г. Камского водохранилища привело к затоплению устьевых участков и образованию крупных заливов, в том числе Косьвинского.

Для исследований выбран участок реки, расположенный ниже Широковского водохранилища, так как выше по течению отсутствуют источники техногенного воздействия. В бассейне реки расположено восемь изливов шахтных вод, которые характеризуются кислой реакцией среды (рН 2,3–2,9), сульфатным железисто-кальциевым составом и минерализацией до 13,3 мг/дм<sup>3</sup> [12]. Из всех изливов в р. Косьву суммарно поступает в водоток до 15,8 млн м<sup>3</sup> вод с опасным для окружающей среды химическим составом, при этом объем изливов зависит от водности года. В связи с закарстованностью территории часть шахтных вод поступает в реки в виде родников. Характеристика источников кислых шахтных вод, дающих наибольший вклад в загрязнение р. Косьвы по



Источники загрязнения р. Косьвы и местоположение отбора проб  
Pollution sources and sampling points at the Kosva River

данным [13], приведена в табл. 1, их положение на местности показано на рисунке.

### Методы

Пробы воды и донных отложений были отобраны осенью 2020 г., точки отбора проб показаны на рисунке. Точка 1 располагается ниже излива из шахты им. Калинина на удалении 18,9 км от створа плотины Широковской ГЭС, точка 2 — ниже излива из трубного ходка шахты им. Крупской (23,2 км от плотины), точка 3 — в районе острова Белый, в 25,2 км от плотины и в 6,3 км от основного источника загрязнения, точка 4 — в районе п. Пермское, в 96,4 км от плотины ГЭС.

Для определения содержания в воде микроэлементов пробы воды отбирались согласно ГОСТ 31861-2012. Для определения форм переноса микроэлементов в твердой фазе пробы воды отбирались в пластиковые бутылки, предварительно промытые дистиллированной водой, объемом 1,5 л, заполнялись водой так, чтобы не оставалось пузырьков воздуха. В лаборатории пробы воды фильтровали последовательно, используя фильтры с размерами пор 2,5 и 0,45 мкм и определяли в фильтратах содержания микроэлементов. По разнице содержания микроэлементов между фильтратами получали данные по их распределению между следующими формами переноса: в составе грубодисперсной взвеси, мелкодисперсной взвеси и в составе коллоидной взвеси и в водорастворенной форме суммарно.

Пробы верхнего слоя донных отложений в лабораторных условиях тщательно перемешивались и делились на две равные части. Одна часть пробы использовалась для определения общего содержания микроэлементов в донных отложениях, для чего она сушилась на воздухе при комнатной температуре, из-

мельчалась в ступке, просеивалась через сито и фракцию менее 0,2 мм и передавалась на химический анализ. Другая часть пробы донных отложений использовалась для последовательных экстракций с целью определения содержания микроэлементов в разных химических фракциях донных отложений. Параллельно проводили определение влажности проб для последующего пересчета на сухой вес пробы.

Для определения содержания микроэлементов в составе разных химических фракций донных отложений применялся метод последовательной ступенчатой экстракции по [14] в модификации [15], для чего влажный осадок экстрагировался соответствующими растворами на водяной бане с последующим определением в растворах содержания элементов. Данный метод позволяет определить содержание микроэлементов в следующих компонентах донных отложений: обменные ионы, карбонаты и гидроксиды, водные оксиды; лабильное органическое вещество и аморфные сульфиды металлов; стабильное органическое вещество (гуминовые кислоты и фульвокислоты); консолидированное органическое вещество, оксиды и сульфиды; твердое остаточное вещество. Полученные значения содержания элементов в разных химических фракциях пересчитывались на сухой вес донных отложений.

Содержание металлов определяли методом масс-спектрометрии с использованием индуктивно связанной плазмы (ICP-MS) в аккредитованной лаборатории.

Коэффициент распределения элемента в системе вода — донные отложения ( $CR$ ) вычислялся по отношению содержания элемента в донных отложениях к его содержанию в воде [16]. Этот параметр численно равен коэффициенту накопления элемента в донных отложениях ( $Kd$ ), но не идентичен ему по смыс-

лу, так как неизвестно, какое равновесие существует между текущей речной водой и донными отложениями. При отборе проб в конкретном месте неизвестна также доля осадка, которая была перенесена из места, находящегося выше по течению.

Суточный масштаб образования техногенной взвеси определяли по суммарному количеству образующихся гидроксидов элементов ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Mn}(\text{OH})_2$ ), исходя из их содержания в водах основных источников загрязнения и их дебета [13].

### Результаты и их обсуждение

#### Количество взвеси техногенного происхождения в р. Косье

Для каждой из трех дат опробования в весенне-осенний период 2020 г. была определена величина суточного образования техногенной взвеси. Вычисленные значения показывают, что наибольший вклад в загрязнение р. Косьвы техногенной взвесью приходится на излив из штоль-

ни шахты им. Калинина до 45 300 кг/сут (81 – 95%). Вторым по значимости является излив из трубного ходка шахты им. Крупской до 6550 кг/сут (2 – 12%), наименьший вклад у родника 417а – максимум 56 кг/сут (0,01 – 0,1%).

#### Распределение микроэлементов в воде и донных отложениях

Известно, что в кислых растворах микроэлементы находятся в основном в виде свободных водных катионов и переносятся преимущественно в виде истинных растворов [7, 9]. При встрече кислых вод с нейтральными происходит повышение pH и перераспределение форм миграции элементов. Например, основной формой миграции алюминия в таких условиях становится миграция в составе частиц коллоидного размера. С данной формой миграции оказывается связанной и подавляющая часть других микроэлементов [17, 18].

Данные по содержанию микроэлементов в воде и донных отложениях

Таблица 2

#### Содержание элементов в пробах воды и донных отложений р. Косьвы Content of elements in samples of water and bottom sediments from the Kosva River

Элемент	Ниже излива из шахты Калинина			Ниже излива из трубного ходка шахты им. Крупской			В районе острова Белый			В районе п. Перемское		
	вода, мг/л	осадок, мг/кг	CR, л/кг	вода, мг/л	осадок, мг/кг	CR, л/кг	вода, мг/л	осадок, мг/кг	CR, л/кг	вода, мг/л	осадок, мг/кг	CR, л/кг
Al	0,154	43 384	281 714	2,412	15 039	6235	0,188	25 806	137 266	0,046	44 120	959 130
Ti	0,002	3096	1548 000	0,009	536	59 556	0,002	1263	631 500	0,005	2790	558 000
Mn	0,09	313	3478	1,12	412	368	0,08	1656	20 700	0,09	573	6367
Zn	0,014	186	13 286	0,053	738	13 925	0,004	712	178 000	0,005	148	29 600
Li	0,005	29,3	5860	0,055	6,42	117	0,007	13,9	1986	0,012	33,4	2783
Mo	0,001	1,26	1260	0,0002	5,28	26 400	0,001	3,5	3500	0,001	0,88	880
Cr	0,004	86,6	21 650	0,022	24,6	1118	0,003	49,1	16 367	0,004	84,2	21 050
Co	0,001	13,9	13 900	0,023	12	522	0,001	34	34 000	0,001	26,3	26 300
Ni	0,006	39,1	6517	0,053	26,2	494	0,004	52,6	13 150	0,003	49,8	16 600



представлены в табл. 2. По мере удаления от источников загрязнения содержание микроэлементов в воде снижается [9, 19]. По мнению многих авторов, это происходит в результате не только обычного разбавления речными водами, но и в результате связывания микроэлементов новообразующимся осадком [18, 20, 21].

В зоне смешения отмечается снижение содержания микроэлементов в воде на 75% и более, что приводит к тому, что оно становится в тысячи раз меньше содержания микроэлементов в новообразованном осадке и, соответственно, наблюдается высокая, от 1000 и более, величина  $CR$  – коэффициента распределения элемента в системе «вода – донные отложения» [16], с чем согласуются результаты наших исследований. При этом отмечается, что численные значения коэффициента  $CR$  для водото-

ков, принимающих кислые шахтные воды, варьируют в очень широких пределах даже для одного элемента, что также наблюдается в данном исследовании [16].

Рост содержания микроэлементов в наиболее удаленной от источников загрязнения пробе донных отложений (точка 4) может быть объяснен накоплением в точке опробования техногенного осадка в результате изменения гидродинамических условий водотока, так как данная точка отбора находится в зоне влияния подпора водохранилища, и у реки изменяется гидрологический режим. Соответственно, доля техногенного осадка в отбираемом верхнем слое донных отложений в данной точке будет значительно выше, чем в точках, расположенных выше по течению.

Таким образом, величина коэффициента  $CR$  для микроэлементов в р. Косье

Таблица 3

**Формы переноса микроэлементов в р. Косье**  
**Forms of transfer of microelements in the Kosva River**

Элемент	1 – ниже излива из шахты Калинина	2 – ниже излива из трубного ходка шахты им. Крупской	3 – в районе острова Белый	4 – в районе п. Перемское
Li				
Al				
Ti				

Cr				
Mn				
Co				
Ni				
Cu				
Zn				
Mo				

Условные обозначения: 1 – грубодисперсная взвесь (более 2,5 мкм); 2 – мелкодисперсная взвесь (2,5–0,45 мкм); 3 – коллоидная взвесь и водорастворенная форма (менее 0,45 мкм)



изменяется в пределах, сопоставимых с величинами коэффициента для других водотоков, в которых формируется загрязнение в результате взаимодействия с кислыми шахтными водами.

$CR$  — коэффициент распределения элемента в системе «вода — донные отложения», вычисленный как отношение содержания элемента в донных отложениях к его содержанию в воде [16].

#### *Формы переноса микроэлементов в речной сети*

Исследования по определению форм переноса элементов в наземных водотоках показали, что фильтрование водных проб через фильтры с диаметром пор 0,45 мкм не приводит к удалению коллоидных частиц из раствора, в связи с чем содержание микроэлементов в данном фильтрате принято считать суммой их содержания в составе частиц коллоидного размера и в составе водного раствора, то есть в водорастворенном состоянии [18].

Результаты исследования показали, что основными формами переноса для всех исследуемых микроэлементов являются водорастворенная форма и форма, связанная с веществом в коллоидном состоянии (табл. 3). Использованный нами метод не позволил отделить коллоидную форму переноса элементов от водорастворенной, однако из литературы известно, что в растворенной форме может находиться более 90% марганца и около 75% цинка [19], а также 65 — 90% кобальта, никеля и меди [20].

Исследования показали, что в составе водной взвеси грубодисперсного размера (более 2,5 мкм) может переноситься до 67% алюминия, 61% молибдена, 41% кобальта, 35% хрома, 31% никеля, 17% марганца, 15% титана, 14% меди, 4% лития и цинка от их общего содержания в воде. В составе мелкодисперсного вещества (0,45 — 2,5 мкм) водами

реки может переноситься до 40% титана и 35% алюминия.

#### *Распределение металлов в донных отложениях*

Содержание микроэлементов в разных химических фракциях донных отложений показано в табл. 4. Основное содержание всех микроэлементов приходилось на фракцию консолидированного органического вещества, оксидов и сульфидов и фракцию твердого остаточного вещества. В этих фракциях суммарно содержались весь титан, до 99% лития и цинка, до 98% алюминия и хрома, до 96% марганца и молибдена, до 95% никеля, до 94% меди, до 93% кобальта. Содержание микроэлементов в данных фракциях донных отложений снижалось по мере удаления от источника загрязнения, при этом увеличивалось содержание элементов в первых трех фракциях. Титан в незначительном количестве обнаруживался также во фракциях лабильного органического вещества и аморфных сульфидов металлов.

С фракцией лабильного органического вещества и аморфных сульфидов металлов были связаны следующие количества исследуемых микроэлементов: кобальт — до 16%, медь и никель — до 13%, цинк — до 9%, литий — до 8%, марганец — до 7%, хром — до 4%, алюминий — до 3%, молибден — до 2%, титан — менее 1%. Эта фракция донных отложений считается кислоторастворимой, может высвобождать элементы в окружающую среду в условиях закисления, происходящего при сезонном увеличении объемов изливов. В кислоторастворимой фракции пробы донных отложений в районе острова Белый (25,2 км от плотины Широковской ГЭС, удаленной от источников поступления кислых шахтных вод), наблюдалось снижение содержания всех элементов, в той же фракции пробы в районе п. Перем-

Таблица 4

**Содержание элементов в разных химических фракциях донных отложений, %**  
**Content of elements per chemical fractions of bottom sediments, %**

Элемент	1 – ниже излива из шахты им. Калинина						2 – ниже излива из трубного ходка шахты им. Крупской					
	фракция 1	фракция 2	фракция 3	фракция 4	фракция 5	фракция 6	фракция 1	фракция 2	фракция 3	фракция 4	фракция 5	фракция 6
Li	0,9	1,1	5,0	0,7	80,2	12,1	0,6	0,2	0,5	0,8	5,6	92,3
Al	0,1	0	1,5	4,3	30,5	63,6	0	0	1,3	4,1	2,0	92,6
Ti	0	0	0,3	0	6,3	93,4	0	0	0	0	1,8	98,2
Cr	0,3	0	4,3	3,4	40,3	51,7	0,3	0	0	4,3	4,4	91,0
Mn	0,1	1,7	2,5	0	73,3	22,4	0,5	3,4	0,7	0	5,7	89,7
Co	0,2	3,9	12,2	0,1	77,4	6,2	0,3	2,7	3,4	0,3	17,3	76,0
Ni	0	3,5	11,5	0	81,9	3,1	0	2,6	4,2	0	6,3	86,9
Cu	0	0	5,2	0,4	93,1	1,3	1,0	0	9,9	0,2	5,8	83,1
Zn	0	4,1	3,2	0	76,4	16,3	0	0,3	0,7	0,1	45,7	53,2
Mo	0,7	2,8	2,1	6,0	65,1	23,2	2,3	0	1,0	2,1	4,0	90,6
Элемент	3 – в районе острова Белый						4 – в районе п. Перемское					
	фракция 1	фракция 2	фракция 3	фракция 4	фракция 5	фракция 6	фракция 1	фракция 2	фракция 3	фракция 4	фракция 5	фракция 6
Li	0,2	0,1	0,5	0,4	60,0	38,8	0,9	1,5	8,1	1,1	32,2	56,2
Al	0	0,1	0,8	1,6	9,7	87,8	0	0	2,6	4,5	4,1	88,8
Ti	0	0	0	0	2,5	97,5	0	0	0,3	0	1,7	98,0
Cr	0	0	0,3	1,7	15,6	82,4	0	0	3,2	3,7	8,3	84,8
Mn	0,4	4,4	0,7	0	3,9	90,6	1,3	23,8	6,7	0	12,7	55,6
Co	0,2	4,5	1,8	0,1	11,0	82,4	0,1	12,1	15,7	0,1	9,7	62,3
Ni	0	3,6	1,4	0	14,2	80,8	0	6,7	13,2	0	10,8	69,3
Cu	0	0	6,0	0,1	24,1	69,8	0,2	0	12,9	0,8	11,4	74,7
Zn	0	1,3	0,7	0	23,5	74,5	0	5,8	9,1	0	6,7	78,4
Mo	1,4	0,3	0,8	1,6	3,4	92,5	5,8	0	0	6,8	17,4	70,0

Фракция 1 – обменные ионы, карбонаты и гидроксиды; фракция 2 – водные оксиды; фракция 3 – лабильное органическое вещество и сульфиды металлов; фракция 4 – стабильное органическое вещество (гуминовые кислоты и фульвокислоты); фракция 5 – консолидированное органическое вещество; оксиды и сульфиды; фракция 6 – твердое остаточное вещество.

ское (96,4 км от плотины Широковской ГЭС) содержание микроэлементов возрастало, за исключением молибдена, который в данной пробе не обнаруживался. Фракция обменных ионов, карбонатов и гидроксидов и фракция водных оксидов считаются химически подвиж-

ными, и при изменении геохимических условий могут высвободить микроэлементы в окружающую среду [15, 21, 22].

В пробах донных отложений в химически подвижных фракциях находилось следующее количество исследуемых микроэлементов от их общего содержа-

ния в донных отложениях: марганец — до 25%, кобальт — до 12%, никель — до 7%, цинк и молибден — до 6%, литий — до 2%, медь — до 1%, алюминий и хром — менее 1%. Титан в химически подвижных фракциях не обнаруживался. В химически подвижной фракции пробы донных отложений в районе острова Белый, удаленной от источников поступления кислых шахтных вод, наблюдалось снижение содержания лития, хрома, цинка и молибдена и увеличение содержания марганца, кобальта и никеля. В этой же фракции в районе п. Перемское содержание всех элементов возрастало за исключением алюминия и хрома.

### **Заключение**

Река Косьва является крупным левобережным притоком Камского водохранилища, протекающим по территории Кизеловского угольного бассейна, где принимает кислые воды из шахтных изливов и родников. Проведенные исследования позволили выявить механизм и формы переноса микроэлементов в исследуемом объекте.

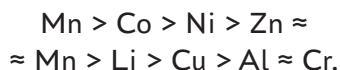
При попадании кислых шахтных вод в р. Косьву наблюдается образование техногенной взвеси вследствие выпадения из раствора нерастворимых гидроксидов железа, алюминия и марганца. Определены суточные масштабы образования техногенной взвеси из разных источников: наибольший вклад в ухудшение экологического состояния р. Косьвы техногенной взвесью поступает из излива, из штольни шахты им. Калинина (81 — 95%), вторым по значимости является излив из трубного хода шахты им. Крупской (2 — 12%), наименьший вклад в образование техногенной взвеси наблюдается у родника 417а (0,01 — 0,1%). Большинство микроэлементов находилось в кислых шахтных водах в водорастворенном состоянии.

Разделение взвеси на фракции по размеру частиц показало, что по мере удаления от зоны поступления кислых шахтных вод преобладающими формами переноса основной массы исследованных микроэлементов в р. Косьва становятся водорастворенная форма и взвесь коллоидного размера. При этом алюминий, титан, кобальт и никель обнаруживались в составе взвеси грубодисперсного размера даже в 73 км от зоны поступления кислых шахтных вод. Никель, медь, цинк и молибден не обнаруживались в составе взвеси мелкодисперсного размера ни в одной из проб.

Осаждение взвеси на дно р. Косьвы приводит к накоплению микроэлементов в донных отложениях, это происходит неравномерно: наибольшее ее накопление наблюдается на участках изменения гидродинамического режима реки, а именно уменьшения скоростей потока.

Определение методом последовательной ступенчатой экстракции распределения микроэлементов по разным химическим фракциям донных отложений показало, что основное содержание всех исследуемых элементов приходится на фракцию консолидированного органического вещества, оксидов и сульфидов и фракцию твердого остаточного вещества. Содержание микроэлементов в данных фракциях снижается по мере удаления от источников поступления кислых шахтных вод, при этом увеличивалось содержание микроэлементов, за исключением алюминия и хрома, в химически подвижных фракциях (фракции обменных ионов, карбонатов и гидроксидов и фракции водных оксидов), а также в кислоторастворимой фракции, за исключением молибдена, содержание которого в кислоторастворимой фракции снижалось до нуля. Титан в химически подвижных фракциях исследованных донных отложений не обнаруживался. По степени подвижности в системе «во-

да — донные отложения» исследованные микроэлементы могут быть выстроены в следующем порядке:



Таким образом, накопившиеся в русле реки и в значительной степени в Косьвинском заливе Камского водохра-

нилища техногенные отложения, образовавшиеся в результате смешения кислых шахтных вод с речными, могут явиться источником вторичного загрязнения вод реки микроэлементами в случае изменения условий окружающей среды, что необходимо учитывать при разработке природоохранных мероприятий по реабилитации рек.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавришин А. И. Применение цифровой классификационной технологии при анализе техногенных изменений окружающей среды в восточном Донбассе // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2020. — № 1. — С. 11–17. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-1-11-17.

2. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Влияние экологического ущерба, накопленного от горнодобывающей деятельности, на состояние гидросферы Среднего Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2013. — № 6. — С. 110–118.

3. Wright I. A., Pacuszkiewicz 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 Soil Pollut. 2018, vol. 229, article 55. DOI: 10.1007/s11270-018-3718-0.

4. 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.

5. 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.

6. Chen M., Li F., Tao M., Hu L., Shi Y., Liu Y. 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.

7. Yi L., Gao B., Liu H., Zhang Y., Du C., Li Y. Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a uranium mining area // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020, vol. 17, no. 2, article 548. DOI: 10.3390/ijerph17020548.

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

9. Grande J. A., Santisteban M., Perez-Ostale E., Valente T., de la Torre M. L., Gomes P., Barrios-Parra F. Dilution versus pollution in watercourses affected by acid mine drainage. A graphic model for the Iberian Pyrite Belt (SW Spain) // Mine Water and the Environment. 2018, vol. 37, pp. 211–216. DOI: 10.3390/ijerph17020548.

10. 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.

11. Li H., Yang J., Ye B., Jiang D. Pollution characteristics and ecological risk assessment of 11 unheeded metals in sediments of the Chinese Xiangjiang River // Environmental Geochemistry and Health. 2019, vol. 41, no. 3, pp. 1459–1472. DOI: 10.1007/s10653-018-0230-9.

12. Pyankov S. V., Maximovich N. G., Khayrulina E. A., Berezina O. A., Shikhov A. N., 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, no. 3, pp. 606 – 621. DOI: 10.1007/s10230-021-00761-7.

13. Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна: [сайт]. URL: <http://kub.maps.psu.ru>.

14. Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Analytical Chemistry*. 1979, vol. 51, pp. 844 – 851.

15. Hakansson K., Karlsson S., Allard B. Effects of pH on the accumulation and redistribution of metals in a polluted stream bed sediment // *Science of the Total Environment*. 1989, vol. 87/88, pp. 43 – 57.

16. 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.

17. Kimball B. A., Callender E., Axtmann E. V. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, USA // *Applied Geochemistry*. 1995, vol. 10, no. 3, pp. 285 – 306. DOI: 10.1016/0883-2927(95)00011-8.

18. Ji H., Li H., Zhang Y., Ding H., Gao Y., Xing Y. Distribution and risk assessment of heavy metals in overlying water, porewater, and sediments of Yongding River in a coal mine brownfield // *Journal of Soils and Sediments*. 2018, vol. 18, pp. 624 – 639. DOI: 10.1007/s11368-017-1833-y.

19. Torre B. M., Borrero-Santiago A. R., Fabbri E., Guerra R. Trace metal levels and toxicity in the Huelva Estuary (Spain). A case study with comparisons to historical levels from the past decades // *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. 2019, vol. 1, pp. 12 – 18. DOI: 10.1016/j.eneco.2019.07.002.

20. Sojka M., Jaskuła J., Siepak M. Heavy metals in bottom sediments of reservoirs in the lowland area of Western Poland: Concentrations, distribution, sources and ecological risk // *Water*. 2018, vol. 11, no. 1, article 56. DOI: 10.3390/w11010056.

21. 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.

22. Semenov I., Sharapova A., Lednev S., Yudina N., Karpachevskiy A., Klink G., Koroleva T. Geochemical partitioning of heavy metals and metalloids in the ecosystems of abandoned mine sites. A case study within the Moscow brown coal basin // *Water*. 2022, vol. 14, no. 1, article 113. DOI: 10.3390/w14010113. **PMAB**

## REFERENCES

1. Gavrishin A. I. Application of digital classification technology in the analysis of man-made environmental changes in the eastern Donbass. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2020, no. 1, pp. 11 – 17. [In Russ]. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-1-11-17.

2. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Influence of environmental damage accumulated from mining activities on the state of the hydrosphere of the Middle Urals. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013, no. 6, pp. 110 – 118. [In Russ].

3. 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 Soil Pollut.* 2018, vol. 229, article 55. DOI: 10.1007/s11270-018-3718-0.

4. 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.

5. 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.

6. Chen M., Li F., Tao M., Hu L., Shi Y., Liu Y. 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.

7. Yi L., Gao B., Liu H., Zhang Y., Du C., Li Y. Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a uranium mining area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, vol. 17, no. 2, article 548. DOI: 10.3390/ijerph17020548.

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

9. Grande J. A., Santisteban M., Perez-Ostale E., Valente T., de la Torre M. L., Gomes P., Barrios-Parra F. Dilution versus pollution in watercourses affected by acid mine drainage. A graphic model for the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Mine Water and the Environment*. 2018, vol. 37, pp. 211–216. DOI: 10.3390/ijerph17020548.

10. Zakrutkin V. E., Gibkov E. V., Reshetnyak O. S., Reshetnyak V. N. Bottom sediments as an indicator of primary and secondary pollution of river waters in the coal mining areas of Eastern Donbass. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2020, vol. 84, no. 2, pp. 259–271. [In Russ].

11. Li H., Yang J., Ye B., Jiang D. Pollution characteristics and ecological risk assessment of 11 unheeded metals in sediments of the Chinese Xiangjiang River. *Environmental Geochemistry and Health*. 2019, vol. 41, no. 3, pp. 1459–1472. DOI: 10.1007/s10653-018-0230-9.

12. Pyankov S. V., Maximovich N. G., Khayrulina E. A., Berezina O. A., Shikhov A. N., 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, no. 3, pp. 606–621. DOI: 10.1007/s10230-021-00761-7.

13. *Geoekologicheskaya geoinformatsionnaya sistema Kizelovskogo ugol'nogo basseyna*, available at: <http://kub.maps.psu.ru>.

14. Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*. 1979, vol. 51, pp. 844–851.

15. Hakansson K., Karlsson S., Allard B. Effects of pH on the accumulation and redistribution of metals in a polluted stream bed sediment. *Science of the Total Environment*. 1989, vol. 87/88, pp. 43–57.

16. 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.

17. Kimball B. A., Callender E., Axtmann E. V. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, USA. *Applied Geochemistry*. 1995, vol. 10, no. 3, pp. 285–306. DOI: 10.1016/0883-2927(95)00011-8.

18. Ji H., Li H., Zhang Y., Ding H., Gao Y., Xing Y. Distribution and risk assessment of heavy metals in overlying water, porewater, and sediments of Yongding River in a coal mine brownfield. *Journal of Soils and Sediments*. 2018, vol. 18, pp. 624–639. DOI: 10.1007/s11368-017-1833-y.

19. Torre B. M., Borrero-Santiago A. R., Fabbri E., Guerra R. Trace metal levels and toxicity in the Huelva Estuary (Spain). A case study with comparisons to historical levels from the past decades. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. 2019, vol. 1, pp. 12–18. DOI: 10.1016/j.enceco.2019.07.002.

20. Sojka M., Jaskuła J., Siepak M. Heavy metals in bottom sediments of reservoirs in the lowland area of Western Poland: Concentrations, distribution, sources and ecological risk. *Water*. 2018, vol. 11, no. 1, article 56. DOI: 10.3390/w11010056.



21. 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.

22. Semenov I., Sharapova A., Lednev S., Yudina N., Karpachevskiy A., Klink G., Koroleva T. Geochemical partitioning of heavy metals and metalloids in the ecosystems of abandoned mine sites. A case study within the Moscow brown coal basin. *Water*. 2022, vol. 14, no. 1, article 113. DOI: 10.3390/w14010113.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Максимович Николай Георгиевич*<sup>1</sup> — 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,

*Хмурчик Вадим Тарасович*<sup>1</sup> — д-р геол.-минерал. наук,

ведущий научный сотрудник,

Естественнонаучный институт,

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,

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный  
исследовательский университет.

**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,

Institute of Natural Science, e-mail: nmax@psu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6220-2730,

*V.T. Khmurchik*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Geol. Mineral.),

Leading Researcher, Institute of Natural Science,

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,

<sup>1</sup> Perm State National Research University,  
614068, Perm, Russia.

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

Получена редакцией 07.07.2022; получена после рецензии 10.08.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 07.07.2022; received after the review 10.08.2022; accepted for printing 10.10.2022.