

# ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОСФЕРЫ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХОВЬЕВ БАССЕЙНА РЕКИ ТАГИЛ, СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Л. С. Рыбникова<sup>1</sup>, П. А. Рыбников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,  
Екатеринбург, Россия

**Аннотация:** Территория эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых представляет собой природно-техническую систему, формирование которой происходит в течение десятков лет под влиянием целого ряда факторов как во время отработки, так и после ее завершения. Период активной эксплуатации сопровождается формированием депрессионных воронок, активизацией геомеханических процессов. В зонах обрушения и отвалах происходит нарушение сплошности пород, увеличение поверхности взаимодействия при активном поглощении атмосферных осадков, обогащенных кислородом. В верхней части гидросферы, нарушенной горными работами, формируется новое природно-техногенное геологическое тело, представленное техногенной зоной гипергенеза – это сернокислотная кора выветривания, обогащенная вторичными минералами, такими как кристаллогидраты сульфатов, гидроксиды, гидроокислы. Завершение отработки сопровождается заполнением депрессионной воронки, появляется новый фактор формирования природно-технической системы отработанной территории: гидросфера на этих участках становится источником выноса ранее накопленного кислотного потенциала. В течение долгих лет она является практически неограниченным поставщиком сульфатов, железа, марганца, свинца и других элементов в подземные и поверхностные воды, что приводит к низким темпам самореабилитации гидросферы горнопромышленных территорий.

**Благодарность:** Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований РАН, тема 0405–2019–0005 и 0328–2019–005, в соответствии с планом 2019–2021 гг. и при поддержке гранта РФФИ 20–45–660014.

**Ключевые слова:** гидросфера, загрязняющие компоненты, месторождение, отработка, постэксплуатационный этап, самореабилитация, модуль гидрохимической нагрузки.

**Для цитирования:** Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Оценка факторов формирования гидросферы природно-технических систем (на примере верховьев бассейна реки Тагил, Свердловская область) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–2. – С. 257–272. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_257.

---

# Assessment of hydrosphere formation factors in nature-and-technology systems: A case-study of the upstream basin of the Tagil River in the Sverdlovsk Region

L. S. Rybnikova<sup>1</sup>, P. A. Rybnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

---

**Abstract:** The territory of actual mineral mining is an integrated system of nature and technology, which has been forming for dozens of years under the influence of many factors, both in the course of operation and after its completion. The period of active operation is accompanied with the formation of depression cones and activation of geomechanical processes. In the collapse zones and in dumps, discontinuities enlarge the interaction surface at active absorption of atmospheric precipitation rich in oxygen. In the upper part of the hydrosphere disturbed by mining operations, a new natural-manmade geological body is formed; it represents an induced hypergenesis zone—this is a sulfuric acid weathering crust enriched with secondary minerals such as sulfate crystallohydrates, hydroxides and hydrous oxides. Termination of mining is accompanied with filling of the depression cone, and a new factor of the nature-and-technology system formation in the mined-out area appears—the hydrosphere in this area becomes a source of yield of the previously accumulated acid potential. For many years, it has been an almost unlimited supplier of sulfates, iron, manganese, lead and other elements to underground and surface water, which leads to low rates of self-rehabilitation of the hydrosphere in the mining areas.

**Key words:** hydrosphere, polluting components, deposit, mining, post-operation stage, self-rehabilitation, hydrochemical load module.

**Acknowledgements:** The studies were implemented in the framework of the Fundamental Research Program of the Russian Academy of Sciences, Topics 0405-2019-0005 and 0328-2019-005 as per research plan for 2019–2021 and with financial support from the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 20-45-660014.

**For citation:** Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Assessment of hydrosphere formation factors in nature-and-technology systems: A case-study of the upstream basin of the Tagil River in the Sverdlovsk Region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–2):257–272. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_257.

---

## Введение

Массовое закрытие горнодобывающих объектов, как в Свердловской области, так и по всему миру, привело к возникновению серьезных экологических проблем [1, 2]. Одна из них — формирование и выход на поверхность кислых шахтных вод [3, 4].

Негативные, а иногда и катастрофические последствия завершенной отработки на постэксплуатационном этапе можно проиллюстрировать многими примерами. 5 августа 2015 г. за счет поступления подземных вод

из штольни шахты Gold King (Колорадо, США), отработанной более 40 лет назад, произошло загрязнение реки Анимас (приток р. Колорадо). Был объявлен режим ЧС в штатах Колорадо и Нью-Мехико, в Сенате США прошли слушания по вопросам предотвращения подобных инцидентов на заброшенных шахтах (сентябрь 2015 г.) [5].

Горнодобывающие предприятия на западе США являются самыми крупными и дорогостоящими объектами, на которых Агентство по охране окружающей среды (EPA USA) про-

водит многолетние работы за счет средств Суперфонда. Так, на территории медного рудника Айрон Маунтен (Iron Mountain Mine), начиная с 1988 г., проводятся широкомасштабные реабилитационные работы, стоимость их варьирует от 3 до 9 млн \$ США в год. По итогам работ в течение 25 лет ЕРА заявило, что достигнуто принципиальное улучшение состояния окружающей среды, а созданная система очистки удаляет до 99 % металлов из кислых вод. Однако показатели, установленные в начале работ, не могут быть достигнуты во всех водных объектах, так как на них продолжают влиять неконтролируемые рассредоточенные (диффузные) источники формирования кислых вод на водосборе. Их полная очистка будет стоить неоправданно дорого [6].

Вопреки ожидавшимся сценариям развития негативных последствий закрытия и затопления угольных шахт в различных угольных бассейнах России, многие вызванные ими явления оказались более длительными и нестабильными. В Кузнецком и Донецком угольных бассейнах значительные территории оказались подтопленными, загрязнены и выведены из строя питьевые водозаборы, наблюдаются выходы токсичных газов и просадки земной поверхности. После закрытия шахт Кизеловского бурогоугольного бассейна осталось 19 изливов кислых шахтных вод, которые попадают в бассейны рек Чусовая, Косьва, Яйва, Вильва, а загрязнение поверхностных вод и донных осадков прослеживается до Камского водохранилища [7].

Средний Урал является одним из регионов, где на протяжении нескольких сотен лет роль горнопромышленного комплекса является ведущей в формировании природно-технических систем. Прекращение отработки месторождений полезных ископаемых в послед-

ние годы (начиная с конца двадцатого века) привело к обострению эколого-гидрогеологических проблем региона, особенно в связи с необходимостью решения проблемы накопленного вреда окружающей среде [8]. Одним из наиболее активных участников такого процесса являются отработанные и затопленные медноколчеданные рудники, несколько таких объектов расположено в верховьях р. Тагил, Средний Урал, Свердловская область (рис. 1).

Целью работы является исследование трансформации состава подземных и поверхностных вод старопромышленного района для выявления и ранжирования комплекса факторов формирования гидросферы природно-технологических систем на примере верховьев бассейна р. Тагил (Свердловская обл.). Для установления зависимостей, формирующих состояния гидросферы, необходимо привлечение таких методов исследований, которые, с одной стороны, характеризуют процессы трансформации подземных вод, включая их прогнозные оценки, а с другой стороны, — позволяют получить количественные характеристики показателей, указывающих на степень изменения подземной и поверхностной гидросферы в результате негативного влияния горнотехнических систем.

Объект исследования — гидросфера природно-техногенных систем старопромышленного района. Предмет исследования — факторы, определяющие ее формирование.

### **Материалы и методы**

Мониторинг поверхностных водных объектов и выходов шахтных вод в районе проводится еженедельно организацией, которая осуществляет нейтрализацию шахтных вод, начиная с 2007 г. Определяются наиболее характерные для кислых шахтных вод показатели

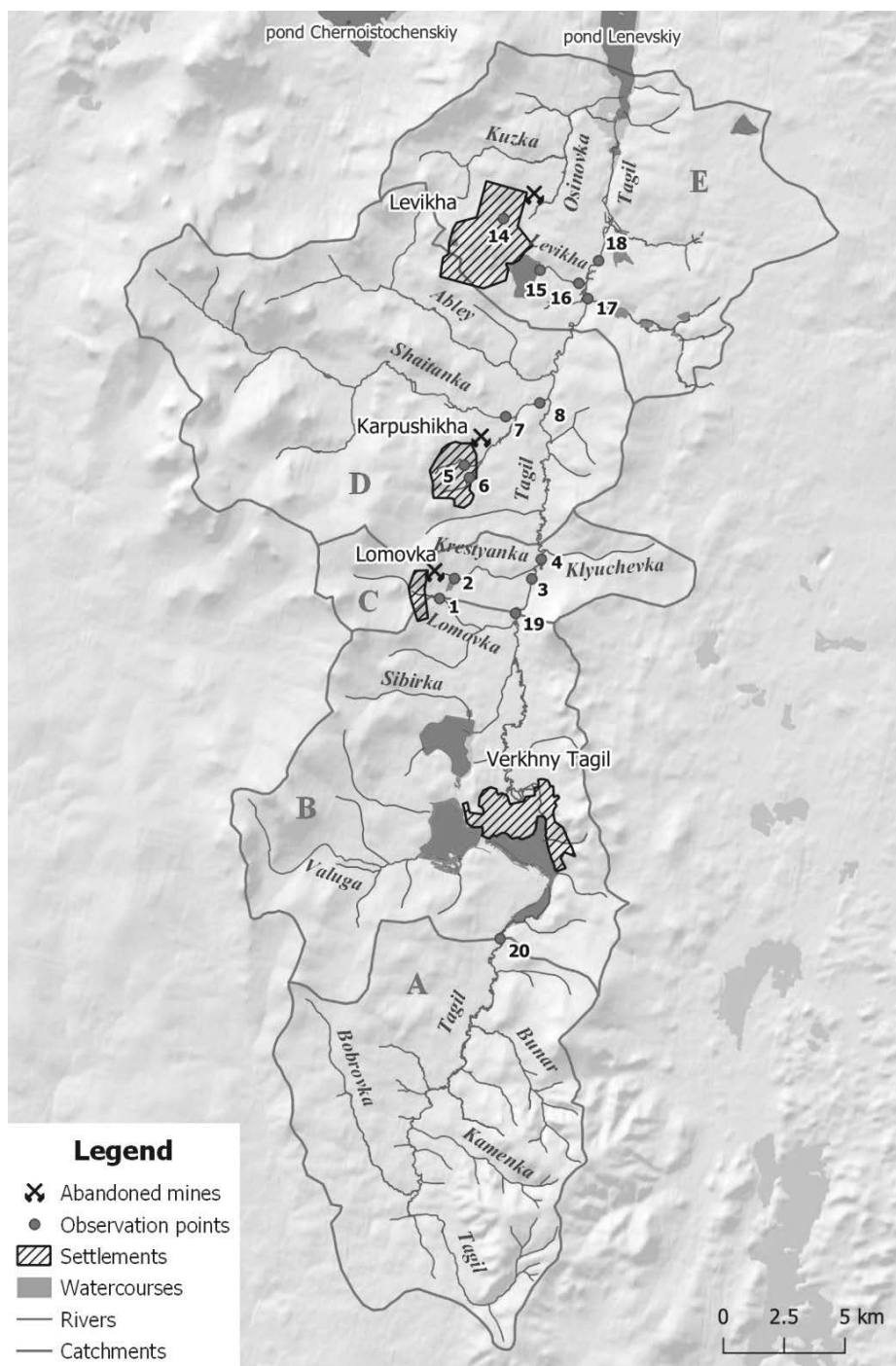


Рис. 1. Схема расположения отработанных медноколчеданных рудников и объектов мониторинга гидросферы в верховьях р. Тагил  
 Fig. 1. Layout of mined-out copper–pyrite mines and hydrosphere monitoring objects in the upstream basin of the Tagil River

загрязнения: сухой остаток, взвешенные вещества, нефтепродукты, содержание сульфат-иона, хлоридов, металлов (медь, цинк, марганец, железо общее), мышьяка и pH. Для их анализа используется потенциометрический, фотометрический и гравиметрический методы (Испытательная химическая лаборатория филиала ГКУСО «Урал-Монацит», п. Лёвиха). Кроме того, периодически выполняется определение содержания микро- и макрокомпонентов в воде по расширенному перечню показателей атомно-эмиссионными и масс-спектральными методами с индуктивно связанной плазмой (Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН). Расположение точек опробования показано на рис. 1.

Для обработки анализов, определения форм миграции ионов и степени насыщенности растворов применялись методы статистического анализа и геохимическое моделирование с использованием программного кода Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1. Код построен на основе MINTEQA2, который был разработан Агентством по охране окружающей среды США (US EPA) [9]. Visual MINTEQ является вторым (после PHREEQC) наиболее используемым программным кодом для физико-химического моделирования и расчета химических равновесий в растворах. Он сочетает в себе современные описания химического равновесия, сорбционных и комплексных реакций с простыми в использовании меню и опциями для импорта и экспорта данных в/из Excel в последней версии. Исходная база данных для MINTEQA2 состоит из 9 баз данных MINTEQ, в том числе основная термодинамическая база данных, база данных твердых тел и база данных компонентов [10].

### **Характеристика объекта исследования**

В верховьях р. Тагил находится несколько медноколчеданных рудников (Белореченский, Карпушихинский, Лёвихинский, Ломовский), обработка которых завершилась в конце двадцатого — начале двадцать первого века. Через 3–5 лет на каждом из них в провалах в зонах обрушения и сдвижения горных пород произошло формирование техногенных водоемов, где шахтные воды разгружаются на поверхность.

Образование провалов происходит, как правило, в процессе обработки месторождения. На медноколчеданных рудниках Среднего Урала при подземной добыче полезного ископаемого использовалась технология обработки с обрушением кровли выработанного пространства. Это приводит к образованию в пределах горного отвода провалов глубиной до 15–35 м, зон обрушения и сдвижения площадью в десятки и сотни гектаров [11]. После завершения добычи и заполнения депрессионной воронки в местах с наиболее низкими отметками формируются участки выхода подземных вод, которые характеризуются пониженными значениями pH и обогащены металлами, сульфатами. Расход разгрузки на таких участках может достигать половины расхода шахтного водоотлива при обработке. На шахтах, использующих систему с закладкой выработанного пространства, провальные процессы не проявляются.

Как правило, для снижения pH шахтных вод и уменьшения растворимости загрязняющих веществ (в первую очередь, металлов) используют негашеную известь, гидроксид натрия (каустическую соду) или известняк. В результате формируются нерастворимые или плохо растворимые осадки,

для их осаждения используются осветлительные пруды. Полученный осадок может высушиваться, и в зависимости от токсичности размещается в выработанном пространстве или на специальных полигонах.

Достоинствами такого метода очистки является простота технологии, доступность и относительная дешевизна, однако для его реализации требуется большое количество реагентов, выделение значительных площадей под размещение прудов-стабилизаторов. Кроме того, не обеспечивается снижение компонентов до показателей,

соответствующих нормативным требованиям.

Несмотря на отмеченные недостатки, нейтрализация кислых вод известковым молоком (или известковым раствором) как у нас в стране, так и за рубежом, является наиболее распространенным методом очистки больших объемов сточных вод.

### Результаты

Для установления закономерностей формирования гидросферы и получения количественных характеристик показателей, указывающих на сте-

Таблица 1

*Содержание компонентов в водных объектах верховьев бассейна р. Тагил (средние значения за 2019 г.)*

*Compositions of water bodies in the upstream basin of the Tagil River (average values as of 2019)*

Номер точки	Водосбор, положение и характеристика точки опробования	Компоненты и их содержание, мг/л					
		pH	Cu	Zn	Fe <sub>общ</sub>	Mn	SO <sub>4</sub>
		ПДКрх [13]					
		6,5–8,5	0,001	0,01	0,1	0,1	100
20	А, верховья, фоновый створ	7,3	0,004	0,01	0,5	0,03	18
19	Б, ниже г. Верхний Тагил	7,0	0,009	0,01	0,4	0,1	38
	Ломовский рудник						
1	В, шахтные воды	3,6	2,15	4,96	7,7	6	825
2	В, пруд-осветлитель	7,7	0,05	0,21	0,2	0,3	360
3	В, р. Тагил, выше сброса	7,6	0,02	0,08	0,7	0,1	43
4	В, р. Тагил, ниже сброса	7,7	0,02	0,03	0,7	0,1	39
	Карпушихинский рудник						
5	Г, шахтные воды	3,6	0,92	5,94	23,7	1,5	318
6	Г, пруд-осветлитель	10,2	0,33	1,3	2,9	0,2	251
7	Г, р. Шайтанка, выше сброса	7,3	0,01	0,02	0,4	0,02	7
8	Г, р. Шайтанка, ниже сброса	7,1	0,02	0,02	0,5	0,02	10
	Лёвихинский рудник						
14	Д, шахтные воды	3,6	17,5	175	1225	65,5	6938
15	Д, пруд-осветлитель	2,9	7,2	109	161	42,4	3525
16	Д, сброс в р.Тагил	4,6	5,7	85	58	35,5	2596
17	Д, р. Тагил, выше сброса	7,4	0,02	0,05	0,7	0,07	35
18	Д, р. Тагил, ниже сброса	7,1	0,14	1,9	1,4	1,2	146

*Примечания. Жирным шрифтом выделены превышения ПДКрх (предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения)*

пень ее изменения в результате негативного влияния горнотехнических систем, для верховьев бассейна р. Тагил (от истоков до Ленеvского водохранилища) выполнено районирование по составу гидросферы в виде модулей гидрохимической нагрузки по основным поллютантам. Площадь водосбора была разбита на несколько частных водосборов, границы которых определяются точками гидрохимического опробования по течению реки. В этих точках имеется достоверная информация о составе поверхностных вод (табл. 1) [12].

Была рассчитана накопленная масса веществ, переносимых рекой Тагил  $M_i = \sum_1^n \frac{C_i F_i}{1000}$ , где  $M_i$  — масса вещества (т/год),  $C_i$  — концентрация (мг/л),  $F_i$  — площадь (км<sup>2</sup>) для  $i$ -го створа. Эти данные использовались для определения модуля гидрохимической нагрузки  $G_1$  в пределах каждого из частных водосборов  $G_i = \frac{M_i - M_{i-1}}{F_i}$ . Результаты расчета представлены в табл. 2 и приведены на рис. 2 и 3.

Масса загрязняющих веществ по течению реки закономерно увеличивается по течению реки (рис. 3). В итоге в Ленеvский пруд ежегодно поступает 7,5 тыс. т сульфатов, по 158 и 156 т цинка и железа, 71 т марганца, 12 т меди. В случае отсутствия сбросов сточных вод в реку Тагил суммарная масса загрязняющих веществ, поступающих в пруд, была бы существенно ниже, особенно для цинка (в 181 раз), меди (в 33 раза), марганца (в 27 раз), железа и сульфата (в 4–5 раз).

Модуль гидрохимического стока сульфат-иона по течению реки Тагил возрастает от 2 т/год·км<sup>2</sup> до 35 т/год·км<sup>2</sup> при среднем значении 5 т/год·км<sup>2</sup> (рис. 4). Наибольшее увеличение модуля гидрохимического стока

происходит для цинка — в 181 раз (от 1,2 кг/год·км<sup>2</sup> до 1,02 т/год·км<sup>2</sup> при среднем 220 кг/год·км<sup>2</sup>), а также меди (от 0,5 до 70 при среднем 20 кг/год·км<sup>2</sup>) и марганца (от 0,04 до 0,43 при среднем 0,1 т/год·км<sup>2</sup>).

Наибольшее приращение массы всех веществ происходит после впадения в р. Тагил реки Лёvихи, в которую осуществляется сброс после нейтрализации шахтных вод Лёvихинского медноколчеданного месторождения (водосбор Д).

Детальный анализ закономерностей формирования гидросферы района Лёvихинского месторождения был выполнен с использованием термодинамического моделирования для 4 водных объектов: от выхода шахтных вод на поверхность до сброса в реку Тагил, в устье р. Лёvихи (рис. 4, табл. 3, 4). Здесь можно проследить те преобразования состава воды, которые происходят на пути от природно-техногенного объекта (зоны разгрузки в техногенном водоеме) через систему очистки до конечного пункта (природного объекта), выявить основные процессы, формирующие состав воды, обосновать подходы к реорганизации существующей системы нейтрализации для снижения экологической нагрузки.

Минерализация воды максимальна в зоне разгрузки (7,1 г/л), после нейтрализации она снижается до 2,6 г/л, однако на сбросе с пруда-отстойника отмечается повышение до 5,8 г/л, сброс в р. Тагил характеризуется снижением до 2,6 г/л.

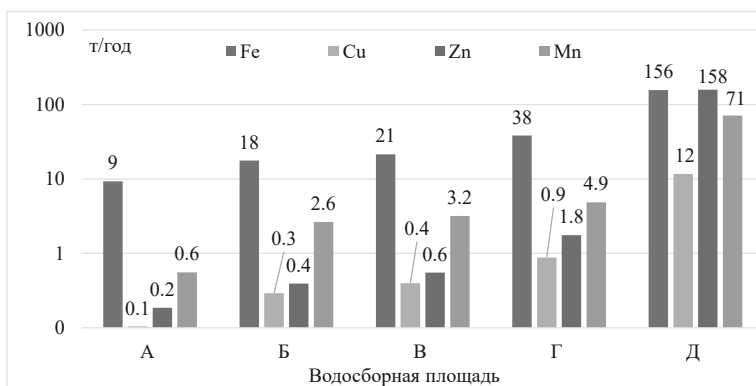
Формы миграции ионов определяются окислительно-восстановительным потенциалом Eh и величиной pH. Значение окислительно-восстановительного потенциала изменяется от 317 мВ на участке разгрузки до -317 после станции нейтрализации (вход в пруд-осветлитель), повышается

Таблица 2

**Масса переносимых веществ по течению р. Тагил (с накоплением) и модуль гидрохимической нагрузки для частных водосборов**  
**Mass of transported substances downstream the Tagil River (with accumulation) and hydrochemical load module for some water catchments**

Водо-сбор	Пло-щадки частных водо-сборов, F, км <sup>2</sup>	Масса веществ, М, т/год					Модуль гидрохимической нагрузки, G, т/год·км <sup>2</sup>				
		SO <sub>4</sub>	Fe	Cu	Zn	Mn	SO <sub>4</sub>	Fe	Cu	Zn	Mn
А	155	334	9	0.1	0.2	0.6	2	6.E-02	8.E-04	1.E-03	4.E-03
Б	174	1126	18	0.3	0.4	2.6	5	5.E-02	1.E-03	1.E-03	1.E-02
В	45	1334	21	0.4	0.6	3.2	5	8.E-02	2.E-03	4.E-03	1.E-02
Г	201	2177	38	0.9	1.8	4.9	4	8.E-02	2.E-03	6.E-03	8.E-03
Д	138	7506	156	12	158	71	35	8.E-01	7.E-02	1.E+00	4.E-01
А-Д*	738	7506	156	12	158	71	10	2.E-01	2.E-02	2.E-01	1.E-01
А-Д**	738	1569	44	0.3	0.9	2.6	2	6.E-02	5.E-04	1.E-03	4.E-03
К***		5	4	33	181	27	5	4	33	181	27

*Примечания.* \* по водосборам А-Д суммарно по фактическим значениям; \*\* по водосборам А-Д суммарно по фоновым значениям; \*\*\* кратность превышения массы вещества фактической по сравнению с фоновыми значениями.



*Рис. 2. Массы выноса (накопительная) загрязняющих веществ по течению р. Тагил*  
*Fig. 2. Escape mass (accumulative) of pollutants downstream the Tagil River*

до 517 на сбросе из него, при движении по руслу р. Лёвихи несколько снижается до 313 мВ. При этом величина рН варьирует от 3,87 в зоне разгрузки до 9,37 после нейтрализации, на сбросе из пруда-осветлителя происходит снижение до 3,17, в устье р. Лёвихи 7,31.

Состав воды во всех пробах сульфатный, основной анион сульфат-ион мигрирует в основном в свободном

виде  $SO_4^{2-}$  и в виде растворенных сульфатных комплексов кальция, магния, алюминия, железа (рис. 5).

Основные катионы представлены более широким набором, во всех пробах присутствуют кальций и магний, в зоне разгрузки и на сбросе из пруда-осветлителя состав более пестрый, здесь в значимом количестве присутствуют алюминий и цинк, кроме того, в зоне



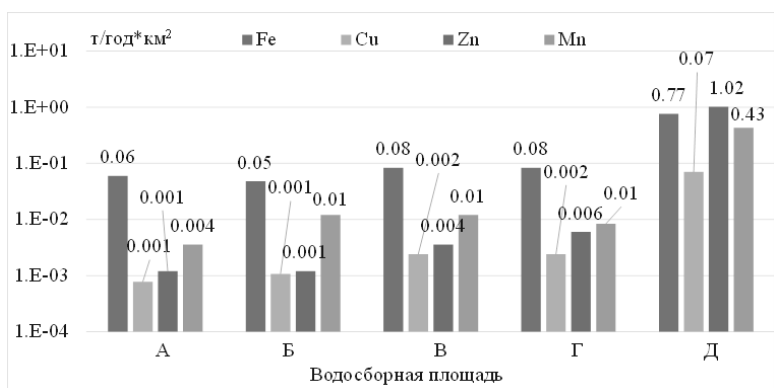


Рис. 3. Модули гидрохимической нагрузки для отдельных водосборных площадей по течению р. Тагил

Fig. 3. Hydrochemical load modules for individual catchment areas along the Tagil River

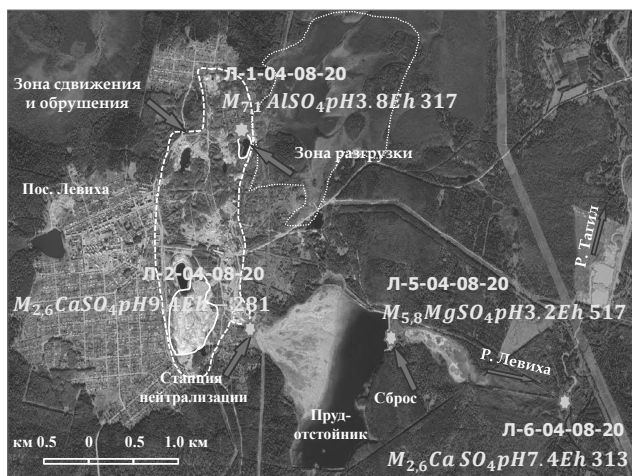


Рис. 4. Схема расположения горно-геологических объектов Левихинского медноколчеданного месторождения и пунктов гидрогеохимического мониторинга. Л-6-04-08-20 – номер пробы,  $M_{2,6}CaSO_4pH9.4Eh281$  – минерализация, состав воды по преобладающим ионам, значения замеренные *in situ*

Fig. 4. Layout of mining and geological objects in the area of Levikha copper-pyrite deposit and hydrogeochemical monitoring network: L-6-04-08-20 – number of sample;  $M_{2,6}CaSO_4pH9.4Eh281$  – salinity, water composition by predominant ions, values measured *in situ*

разгрузки отмечается высокое содержание железа (рис. 6). Железо находится преимущественно в двухвалентной форме  $Fe^{2+}$  и мигрирует в свободном виде и в виде сульфатного комплекса  $FeSO_4$ , на сбросе с пруда-осветлителя появляется еще одна форма миграции в виде гидроксильного иона  $Fe(OH)^+$ . Железо в трехвалентной форме прак-

тически отсутствует во всех пробах. Положение анализируемых проб на диаграмме Пурбэ показано на рис. 7.

Формы миграции алюминия в кислой воде – в кислой среде это сульфатные комплексы (разгрузка шахтных вод на поверхность и сброс с пруда-осветлителя), в нейтральной и щелочной среде – это гидроксильные комплексы (рис. 8).

Таблица 3

Результаты гидрогеохимического мониторинга территории Лёвихинского медноколчеданного месторождения (опробование 04.08.2020)

Hydrogeochemical monitoring data on Levikha copper-pyrite deposit area (sampling as of Aug 4, 2020)

Компонент	Размерность	Содержание компонентов по пробам воды				Степень очистки	ПДК <sub>рх</sub>	Кратность превышения ПДК <sub>рх</sub>
		Л-1-04-08-20 (разгрузка шахтных вод)	Л-2-04-08-20 (станция нейтрализации)	Л-5-04-08-20 (пруд-осветитель)	Л-6-04-08-20 (устье р. Лёвихи)			
Al	моль/л	1.0E-02	1.0E-16	4.4E-03	1.6E-04	61	1.5E-06	110
Ca	моль/л	6.6E-03	1.6E-02	1.0E-02	1.7E-02	0.39	4.5E-03	4
Cu	моль/л	2.0E-04	1.0E-16	7.9E-05	4.7E-06	42	1.6E-08	302
Fe <sup>+2</sup>	моль/л	3.9E-03	2.3E-05	3.2E-04	4.7E-06	830	1.8E-06	3
Fe <sup>+3</sup>	моль/л	5.4E-09	4.3E-10	1.2E-06	1.3E-05	4.E-04	1.8E-06	7
Mg	моль/л	1.2E-02	9.9E-04	1.1E-02	9.5E-03	1.3	1.7E-03	6
Mn	моль/л	1.5E-03	1.0E-16	6.9E-04	2.5E-04	6.0	1.8E-07	1375
Na	моль/л	1.5E-03	1.2E-03	1.0E-03	8.7E-04	1.7	5.2E-03	0.2
Zn	моль/л	1.6E-03	1.0E-16	1.1E-03	6.1E-05	26	1.5E-07	397
SO <sub>4</sub>	моль/л	4.5E-02	1.8E-02	3.1E-02	2.6E-02	1.7	1.0E-03	25
Cl	моль/л	8.7E-04	9.3E-04	8.7E-04	4.5E-04	1.9		
HCO <sub>3</sub>	моль/л	1.0E-04	4.7E-04	1.0E-04	6.0E-04	0.2		
ΣM	мг/л	7110	2640	5750	3870	1.8		
t	град. С	14.5	15.7	20.7	19.1			
Eh	мВ	317	-281	517	313			
pH		3.84	9.37	3.17	7.31			

Таблица 4

Формулы Курлова по пробам воды (опробование 04.08.2020)

Table 4. Kurlov's formulas of water samples (sampling as of Aug 4, 2020)

№№ проб, местоположение	Формула Курлова
Л-1-04-08-20 зона разгрузки шахтных вод	$M_{7,11} \frac{SO_4 99}{Al35Mg27Ca15Fe13Zn4} pH3.84Eh317t14.5$
Л-2-04-08-20 сброс со станции нейтрализации	$M_{2,64} \frac{SO_4 96}{Ca90Mg6} pH9.37Eh281t15.7$
Л-5-04-08-20 сброс с пруда-отстойника	$M_{5,75} \frac{SO_4 98}{Mg36Ca32Al21Zn4} pH3.17Eh517t20.7$
Л-6-04-08-20 устье р. Лёвихи перед впадением в р. Тагил	$M_{2,60} \frac{SO_4 98}{Ca63Mg35} pH7.38Eh313t19.1$

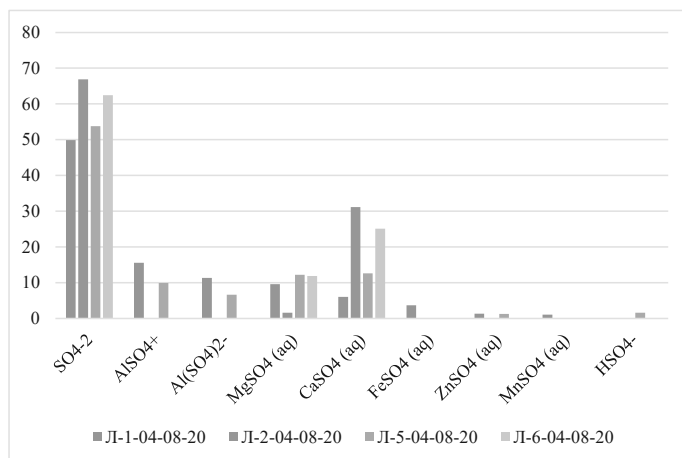


Рис. 5. Формы миграции сульфат-иона  
Fig. 5. Migration modes of ion sulfate

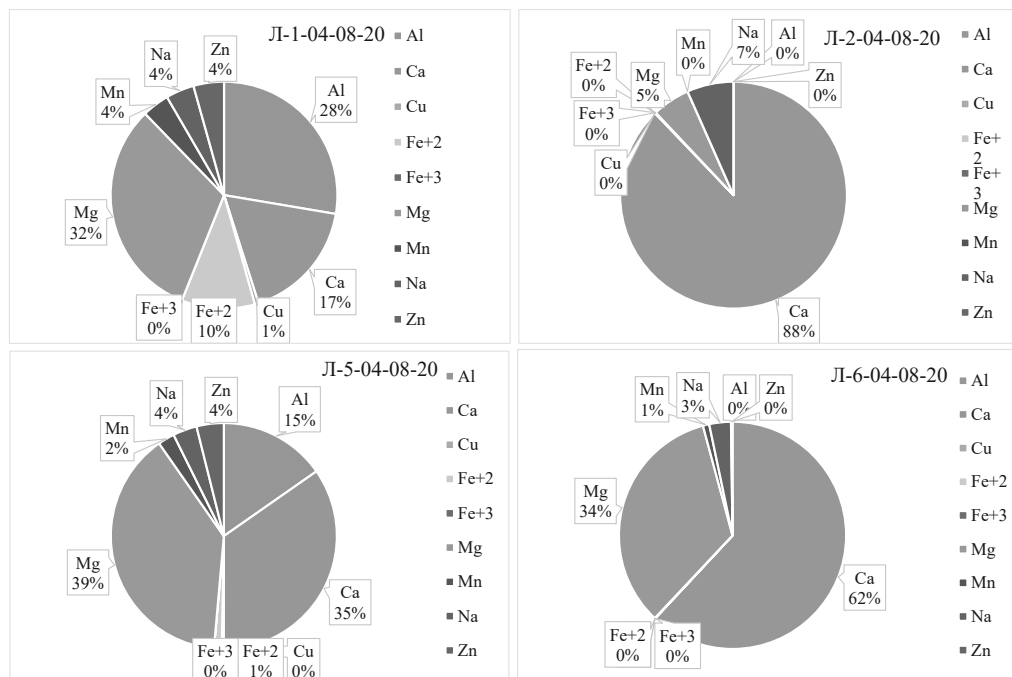


Рис. 6. Содержание катионов в пробах воды  
Fig. 6. Content of cations in water samples

Пруд-отстойник не выполняет полностью свою роль как депонирующая емкость, снижающая содержание всех загрязняющих компонентов. Самая высокая степень очистки достигается по содержанию железа (в 830 раз),

содержание остальных компонентов также уменьшается: алюминия в 61 раз, меди в 42 раза, цинка в 26 раз, марганца в 6 раз, при этом содержание кальция возрастает в 3 раз. (табл. 3). После прохождения системы очистки в сбрасы-



Рис. 7. Диаграмма Пурбэ и данные гидрогеохимического мониторинга  
 Fig. 7. Pourbaix diagram and hydrogeochemical monitoring data

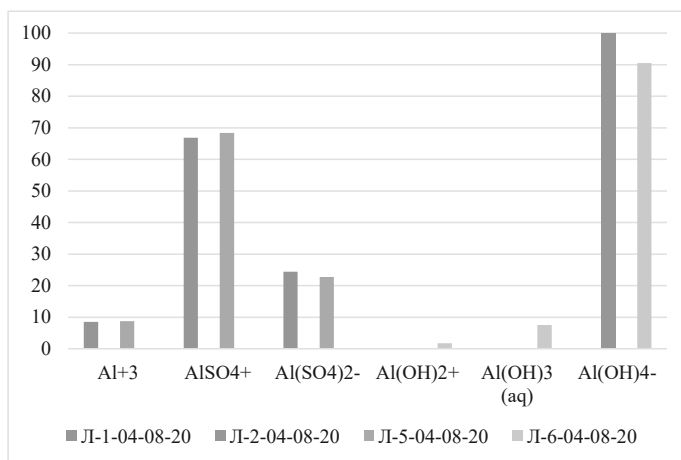


Рис. 8. Формы миграции алюминия  
 Fig. 8. Migration modes of aluminum

ваемых водах сохраняется значительное превышение ПДК для водоемов водохозяйственного значения для всех металлов на несколько порядков, особенно для марганца (1375 ПДК), цинка (397 ПДК), меди (302 ПДК), алюминия (110 ПДК).

**Обсуждение результатов.** Сравнение эффективности очистки шахтных вод рудников, расположенных в пределах рассматриваемого водосбора, показало, что степень загрязнения водных

объектов зависит от нескольких факторов. Это состав шахтных вод, расход их разгрузки, объем пруда-осветлителя, длина пути и скорость течения после нейтрализации. При небольших объемах разгрузки шахтных вод и достаточном расстоянии от пунктов нейтрализации и отстаивания сточных вод до сброса в поверхностные водотоки применяемая система нейтрализации достаточно эффективна. Однако сочетание таких неблагоприятных показате-

лей, как большой расход шахтных вод и очень короткий путь после сброса из пруда-отстойника приводит к экстремальному загрязнению гидросферы.

Низкая эффективность очистки на затопленном Лёвихинском руднике является следствием целого комплекса факторов. Во-первых, исходные концентрации в шахтных водах Лёвихинского рудника гораздо выше (по цинку и железу в 35 и 159 раз), чем содержание этих компонентов в шахтных водах Ломовского рудника (табл. 1). Во-вторых, расход неочищенных шахтных вод на Лёвихинском руднике составляет около 3 тыс. м<sup>3</sup>/сут, это в 10–20 раз больше, чем на Карпушихинском и Ломовском руднике. В-третьих, длина русла р. Лёвихи от места сброса очищенных шахтных вод из пруда-отстойника до ее устья составляет всего 1,4 км, причем в нижней части русло реки спрямлено, в результате чего вода после отстаивания течет слишком быстро и попадает в р. Тагил, не успевая в полной мере вступить во взаимодействие с щелочными реагентами во время повторной нейтрализации. На Ломовском и Карпушихинском рудниках длина пути после сброса очищенных шахтных вод составляет 3,5 км, русло рек Крестьянки и Шайтанки умеренно извилистые, в результате этого вода течет медленно, что обеспечивает достаточную продолжительность времени взаимодействия с щелочными реагентами. В-четвертых, хотя площадь осветлительного пруда на Лёвихинском месторождении самая большая (142 га, на Ломовском 10 га), этого объема недостаточно для полноценного отстаивания после нейтрализации.

Негативное воздействие отработанных объектов недропользования на окружающую среду является следствием проявления нескольких факто-

ров. Во-первых, это природные факторы, поскольку даже в верховьях р. Тагил фоновые концентрации меди, цинка в 4–5 раз превышают ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения. Во-вторых, это техногенно-индуцированные факторы, влияние которых приводит к формированию кислых шахтных вод в течение продолжительного времени даже после завершения отработки на медноколчеданных рудниках. В-третьих, это технологические факторы, связанные с несовершенством используемых методов очистки кислых шахтных вод. Продолжительность самореабилитации гидросферы горнопромышленных территорий на постэксплуатационном этапе, т. е. длительность периода, в течение которого содержание основных загрязняющих компонентов (меди, цинка, железа, марганца) снизится до предельно-допустимых или фоновых значений, составляет десятки и даже сотни лет.

## **Выводы**

1. Целью численного моделирования геосистем как основы для оценки негативного влияния горных работ на гидросферу является выявление процессов формирования состояния и состава подземных и поверхностных вод. Для его реализации выполнена комплексная оценка трансформации состояния подземных и поверхностных вод, которое определяется сложными взаимодействиями гидросферы с другими компонентами окружающей среды под влиянием горнотехнической нагрузки.

2. Сравнение эффективности очистки шахтных вод нескольких затопленных рудников показало, что при небольших объемах разгрузки шахтных вод и достаточном расстоянии от пунктов нейтрализации и отстаивания сточных вод до сброса в поверхностные водо-

токи применяемая система нейтрализации достаточно эффективна. Однако сочетание таких неблагоприятных показателей, как большой расход шахтных вод и очень короткий путь после сброса из пруда-отстойника, приводит к экстремальному загрязнению гидросферы.

3. При оценке трансформации состава подземных и поверхностных вод для выявления и ранжирования комплекса исследуемых факторов изучены характеристики и возможности систем гидрогеохимического моделирования, поскольку разработка универсальной методики, позволяющей решать широкий круг геохимических задач вне зависимости от минерализации и состава природного раствора, остается весьма актуальной.

4. Методика численного моделирования состояния гидросферы реализована на примере Лёвихинского

медноколчеданного месторождения. Прослежены преобразования состава воды, которые происходят на пути от природно-техногенного объекта (зоны разгрузки в техногенном водоеме) через систему очистки до конечного пункта (природного объекта), выявлены основные процессы, формирующие состав воды, обоснованы подходы к реорганизации существующей системы сброса и нейтрализации для снижения экологической нагрузки.

5. Впервые выполнены: высокоточные полевые измерения параметров, определяющих окислительно-восстановительные условия поверхностных и подземных вод района Лёвихинского рудника; расчеты форм миграции загрязняющих компонентов; раскрыт механизм формирования химического состава кислых шахтных вод, их трансформации после выхода на поверхность и последующей нейтрализации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schneider P., Wolkersdorfer C.* Dimensions of Water Management in the Extractive Industries. — In: *Davis C., Rosenblum E.* (eds): Sustainable Industrial Water Use — Perspectives, Incentives, and Tools. 2021. P. 73—87. doi:10.2166/9781789060676\_0073.

2. *Хохряков А. В., Ларионова И. В., Москвина О. А., Цейтлин Е. М.* Системный подход к обеспечению экологической безопасности в горной промышленности. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 3—1. С. 501—517. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0-501—517.

3. *Nordstrom D. K.* Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // *Applied Geochemistry* 26 (2011) pp. 1777—1791.

4. *Рыбникова Л. С., Рыбников П. А.* Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Лёвихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // *Геохимия*. 2019. Т. 64. № 3. С. 282—299. DOI: 10.31857/S0016—7525643282—299

5. Technical Evaluation of the Gold King Mine Incident San Juan County, Colorado. Peer reviewed by: U. S. Geological Survey, U. S. Army Corps of *Engineers U. S.* Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Technical Service Center. Denver, Colorado. October 2015. 132 p.

6. Fifth Five-Year Review for Iron Mountain Mine Superfund Site Redding, California. US EPA. San Francisco. 2013. 252 p.

7. *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 Кизелов-

ского угольного бассейна, Западный Урал, Россия) // ГИАБ. 2020. №3.1. С. 488 – 500. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2020 – 31 – 0-488 – 500.

8. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Проблемы самореабилитации гидросферы и очистки шахтных вод на постэксплуатационном этапе (на примере Лёвихинского рудника, Средний Урал) // ГИАБ. 2020. №3.1. С. 501 – 503. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2020 – 31 – 0-501 – 513.

9. Allison J. D., Brown D. S., Novo-Gradac, K. J. MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems: version 3.0 user's manual: U. S. Environmental Protection Agency Report EPA/600/3 – 91/021, 1991. 106 p.

10. Wolkersdorfer C., Nordstrom D. K., Beckie R., Cicerone D. S., Elliot T., Edraki M., Valente T. M., França S. C. A., Kumar P., Oyarzún Lucero R. A. and Soler A. I. G. Guidance for the integrated use of hydrological, geochemical, and isotopic tools in mining operations. *Mine Water and the Environment*, 2020, 39(2), p. 204 – 228, doi: 10.1007/s10230-020-00666-x.

11. Мормиль С. И., Сальников В. И., Амосов Л. А. и др. Техногенные месторождения Урала и оценка их воздействия на окружающую среду. Екатеринбург: НИА – Природа, ДПР по Уральскому региону. АООТ «ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ», Геологическое предприятие «Девон», 2002. 206 с.

12. Rybnikova L., Navolokina V. Analysis and Feasibility of Measures to Minimize the Impact of Acid Mine Waters Discharged by Abandoned Copper-Sulphide Mines on Hydrosphere of the Tagil River. E3S Web Conf. Volume 177, 2020. XVIII Scientific Forum “Ural Mining Decade” (UMD 2020). DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017704009>.

13. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. М.: Изд-во ВНИРО, 2011. 257 с. (Утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 с изменениями на 10 марта 2020 года). **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Schneider P., Wolkersdorfer C. Dimensions of Water Management in the Extractive Industries. In: Davis C., Rosenblum E. (eds): Sustainable Industrial Water Use Perspectives, Incentives, and Tools. 2021. P. 73 – 87. doi:10.2166/9781789060676\_0073.

2. Hohryakov A. V., Larionova I. V., Moskvina O. A., Cejtlin E. M. Sistemnyj podhod k obespecheniyu ekologicheskoy bezopasnosti v gornoj promyshlennosti. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. no. 3 – 1. S. 501 – 517. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2020 – 31 – 0-501 – 517. [In Russ]

3. Nordstrom D. K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Applied Geochemistry*, 26 (2011) pp. 1777 – 1791.

4. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Regularities in the Evolution of Groundwater Quality at Abandoned Copper Sulfide Mines at the Levikha Ore Field. *Geohimiya*. 2019. T. 64. no. 3. S. 282 – 299. DOI: 10.31857/S0016 – 7525643282 – 299 [In Russ]

5. Technical Evaluation of the Gold King Mine Incident San Juan County, Colorado. Peer reviewed by: U. S. Geological Survey, U. S. Army Corps of Engineers U. S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Technical Service Center. Denver, Colorado. October 2015. 132 p.

6. Fifth Five-Year Review for Iron Mountain Mine Superfund Site Redding, California. US EPA. San Francisco. 2013. 252 p.

7. Rybnikov P. A., Rybnikova L. S., Maksimovich N. G., Demenev A. D. Investigation of hydrogeological conditions of coal deposits at the post-operational stage using hydrodynamic modeling (on the example of the Kizelovsky coal basin, Western Urals, Russia). *MIAB*.

*Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. no.3.1. S. 488 – 500. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2020 – 31 – 0-488 – 500. [In Russ]

8. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Problems of self-rehabilitation of the hydrosphere and mine water purification at the post-operational stage (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. no.3.1. pp. 501 – 503. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2020 – 31 – 0-501 – 513. [In Russ]

9. Allison J. D., Brown D. S., Novo-Gradac, K. J. MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems: version 3.0 user's manual: U. S. Environmental Protection Agency Report EPA/600/3 – 91/021, 1991. 106 p.

10. Wolkersdorfer C., Nordstrom D. K., Beckie R., Cicerone D. S., Elliot T., Edraki M., Valente T. M., França S. C. A., Kumar P., Oyarzún Lucero R. A. and Soler A. I. G. Guidance for the integrated use of hydrological, geochemical, and isotopic tools in mining operations. *Mine Water and the Environment*, 2020, 39(2), p. 204 – 228, doi: 10.1007/s10230-020-00666-x.

11. Mormil' S. I., Sal'nikov V. I., Amosov L. A. i dr. *Tekhnogennyye mestorozhdeniya Urala i ocenka ih vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu* [Technogenic deposits of the Urals and assessment of their impact on the environment]. Ekaterinburg: NIA Priroda, DPR po Ural'skomu regionu. AOOT «VNIIZARUBEZhGEOLOGIYa», Geologicheskoe predpriyatie «Devon», 2002. 206 p. [In Russ]

12. Rubnikova L., Navolokina V. Analysis and Feasibility of Measures to Minimize the Impact of Acid Mine Waters Discharged by Abandoned Copper-Sulphide Mines on Hydrosphere of the Tagil River. *E3S Web Conf. Volume 177*, 2020. XVIII Scientific Forum "Ural Mining Decade" (UMD 2020). DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017704009>.

13. *Normativy kachestva vody vodnykh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya, v tom chisle normativy predel'no dopustimyh koncentracij vrednykh veshchestv v vodah vodnykh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya* [Standards for water quality of water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in waters of water bodies of fishery significance]. Moscow: Izd-vo VNIRO, 2011. 257 s. (Utverzhdenny prikazom Ministerstva sel'skogo hozyajstva Rossijskoj Federacii ot 13 dekabrya 2016 goda no. 552 izmeneniyami na 10 marta 2020 goda). [In Russ]

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Рыбникова Людмила Сергеевна*<sup>1</sup> – докт. геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, [luserib@mail.ru](mailto:luserib@mail.ru);

*Рыбников Петр Андреевич*<sup>1</sup> – канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, [ribnikoff@yandex.ru](mailto:ribnikoff@yandex.ru);

<sup>1</sup> Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Rybnikova L. S.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), chief researcher of the laboratory of ecology of mining, Institute of mining, Ural branch RAS, 620219, Ekaterinburg, street mum's-the Siberian, 58; [luserib@mail.ru](mailto:luserib@mail.ru).

*Rybnikov P. A.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Leading Researcher, Head of the laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsurface Use, [ribnikoff@yandex.ru](mailto:ribnikoff@yandex.ru);

<sup>1</sup> Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 16.02.2021; получена после рецензии 19.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 16.02.2021; received after the review 19.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.