

УДК 550.424:622.343.5:622'17

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО ТЕХНОГЕНЕЗА (Г. МЕДНОГОРСК)

Корнеева Татьяна Владимировна¹,
korneevatv@ipgg.sbras.ru

Юркевич Наталия Викторовна^{1,2},
yurkevichnv@ipgg.sbras.ru

Аминов Павел Гаязович³,
aminovp@mail.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса 20, I-304.

³ Институт минералогии УрО РАН,
Россия, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник.

Актуальность работы продиктована крупномасштабным загрязнением природных водоемов и рек, которое происходит при впадении в них дренирующих и сезонных потоков из хвостохранилищ и техногенных отвалов, содержащих высокие концентрации металлов, сульфатов и других компонентов. Оценка степени равновесия природно-техногенных вод к гидрогенным минералам в настоящее время является актуальной задачей, решение которой позволит описать природу геохимической специфики техногенных вод и механизмы их формирования, определить источники химических элементов и процессы вторичного минералообразования, формы миграции токсичных элементов в техногенных потоках и их влияние на окружающую среду.

Цель работы: исследование закономерностей вторичного минералообразования в техногенных потоках как основного фактора выведения металлов из растворов.

Методы исследования. Физико-химическое моделирование химических форм нахождения элементов в растворе рассчитывалось при помощи программы WATEQ4f. Одновременно рассчитывались индексы насыщения, указывающие на потенциальную недосыщенность или пересыщенность раствора по отношению к различным минеральным фазам.

Результаты. Изложены результаты физико-химического моделирования вод Медногорской геотехнической системы с применением программного пакета WATEQ4f. Рассчитаны химические формы нахождения элементов и индексы насыщения вод по отношению к ряду минеральных фаз. В исследуемых водах возможно формирование различных гидроксидов и ярозита различного состава, которые неустойчивы при впадении их в р. Жирикля и способны растворяться. Полученные данные свидетельствуют о переходе гётита в ферригидрит в зонах смешения Зеленого и Голубого техногенных ручьев и в реках Жирикля и Блява.

Ключевые слова:

Рудничный дренаж, индекс насыщения, химические формы нахождения, моделирование, WATEQ4f, гидрохимия, техногенные отходы.

Введение

Проблема окисления сульфидов и связанных с ними потоков кислого дренажа (acid mine drainage) является одним из основных направлений мировых исследований за последние 50 лет [1–4]. Химические реакции образования кислого дренажа давно описаны и не вызывают затруднений в понимании, однако конечный состав всегда зависит от геологических особенностей рудного региона, присутствия микроорганизмов, температуры, наличия воды, кислорода, проницаемости твердого вещества отходов и способности вмещающей породы нейтрализовать кислотность [5–7]. Эти факторы сильно варьируют для разных регионов, и по этой причине прогнозная оценка и способы предотвращения кислого рудничного дренажа должны быть тщательно рассмотрены с точки зрения особенностей горнодобывающих районов [8].

Локальные техногенные геохимические аномалии, образующиеся в сфере воздействия конкрет-

ных предприятий горнопромышленного профиля, рассматриваются многими исследователями как природно-техногенные полигоны для исследования процессов вовлечения химических веществ в природные миграционные потоки и взаимодействия техногенных веществ с природными субстратами [9–11]. Геохимические исследования дренажных вод рудных месторождений в последние годы получили достаточно широкое развитие. Связано это в основном с экологическими проблемами, возникающими в горнодобывающих районах и вызывающими необходимость оценки дренажных стоков месторождений как источников техногенного преобразования природной среды. Вытекающие из под сульфидсодержащих отвалов дренажные и техногенные рудничные воды могут отрицательно влиять на качество вод принимающих водотоков, приводя к понижению pH, увеличению общей минерализации, содержания сульфатов и растворенных форм металлов, что обуславливает необходи-

да и уравнений массового баланса с использованием метода непрерывных дробей, описанных В. Wiggley (1977). Программный код WATEQ4f успешно используется для геохимического моделирования как природных вод, так и водных растворов техногенного происхождения (рудничный дренаж). Эта программа была использована для расчета химических форм нахождения, ионной активности и индексов насыщения минеральными фазами в зависимости от измеренной температуры, значений pH, Eh и химического состава проб воды. Распределение химических форм нахождения и индексов насыщения послужили информацией для интерпретации химизма рудничного дренажа.

Рассчитывались индексы насыщения (ИН), представляющие отношения произведений активностей соответствующих компонентов к константе растворения одного из минералов:

$$SI = \lg(IAP/KT),$$

где IAP – равновесная концентрация соединения в растворе, мг/л, KT – константа растворимости соединения при заданной температуре, мг/л. Если ИН=0, раствор находится в равновесии с твердой фазой. При ИН>0 раствор пересыщен по отношению к данному минералу, и возможно его осаждение. При ИН<0 раствор недонасыщен по отношению к минеральной фазе, она будет растворяться. Рассчитав индексы насыщения раствора относительно минеральных соединений заданных элементов, можно сделать выводы о вероятном образовании тех или иных минералов в условиях, близких к равновесным. Расчет индексов насыщения – это простая и наглядная процедура для количественной оценки отклонения системы от равновесия, поскольку сразу же видна степень и направление этого отклонения: положительные их значения указывают на пересыщение раствора по отношению к твердой фазе и наоборот.

Результаты и обсуждения

По результатам гидрохимического исследования подотвальные воды Блявинского рудника характеризуются разной окислительной обстановкой и минерализацией 3.3 и 13 г/л. Нейтральный ручей (Голубой) относится к сульфатно-гидрокарбонатному классу, Ca–Mg типу. Кислый ручей Зеленый – к сульфатному классу, Mg–Al–Ca техногенному типу. Значимыми для определения катионного типа воды в этом случае становятся алюминий, концентрация которого достигает 440 мг/л. Основной ионный состав р. Блявы изменяется по мере впадения в нее притоков. Наблюдается некоторое увеличение минерализации вниз по течению и смена основного ионного состава. Преимущественно гидрокарбонатный Ca–Na тип вод после впадения техногенных стоков сменяется на сульфатный (рис. 2).

Техногенные стоки впадают в реки Жирикля и Херсонка, которые являются правыми притоками второго порядка р. Блява. С их стоком в Блявинские воды поступают Cd, Zn, Ni, Cu, Pb, Fe, Mn и

Al, суммарные концентрации которых в антропогенных ручьях достигают значений вплоть до 0,5–0,9 г/л.

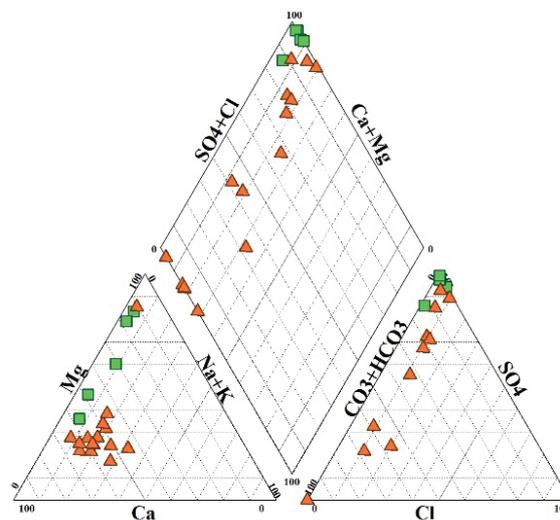


Рис. 2. Классификация поверхностных вод Медногорской ГТС (диаграмма Пайпера, содержания ионов в % экв.)

Fig. 2. Piper diagram showing the chemical composition of Mednogorsk surface water

Изучение химического состава природно-техногенных вод позволило классифицировать их по типам (рис. 3). Соответственно, речные воды на фоновых участках относятся к нейтральному низкометалльному типу по W. Ficklin [22], а весь спектр техногенных вод и зон их смешения с природными подразделяется на два типа – от нейтральных высокометалльных до кислых экстра-высокометалльных вод-рассолов.

Изучение химических форм нахождения металлов в поверхностных водах является важным аспектом при экологических исследованиях водоемов и водотоков, и в частности в зонах их смешения с техногенными потоками, так как именно на них происходит смена физико-химических, а, следовательно, и изменение химических форм нахождения элементов. По данным термодинамических расчетов, большинство металлов находится в водах преимущественно в ионной форме, вторыми по значимости являются сульфатные комплексы, как нейтральные, так и положительно и отрицательно заряженные. Согласно заданным физико-химическим параметрам, основной катионный состав изучаемых вод представлен в виде незакомплексованных ионов Ca^{2+} (50–80 %), Mg^{2+} (70–90 %), Na^+ (99 %), K^+ (90–99 %).

В фоновой точке (197) формы нахождения Al и Fe находятся исключительно в виде гидроксидных комплексов. Химические формы никеля представлены в виде нейтральных карбонатных $NiCO_3^0$, $Ni(CO_3)_2^{2-}$ и небольшой доли акваионных комплексов. Превалирующей формой для свинца также являются нейтральные карбонатные комплексы типа $PbCO_3^0$, с небольшой долей гидроксидных и акваионных форм. Медь находится в виде гидроксид-



Рис. 3. Состав поверхностных вод природных и техногенных ландшафтов Медногорской ГТС по Ficklin [22]

Fig. 3. Ficklin [22] diagram of the samples showing the composition of surface waters of natural and technogenic landscapes of Mednogorsk

ных и карбонатных комплексов. Для бария и кадмия преобладающими формами нахождения являются незакомплексованные ионы, с небольшой долей сульфатных (BaSO_4^0 , CdSO_4^0), гидрокарбонатных (BaHCO_3^+ , CdHCO_3^+) и хлоридных комплексов (CdCl^+). Для марганца характерны свободнионные, карбонатные и гидрокарбонатные (MnCO_3^0 , MnHCO_3^+) комплексы и небольшая доля сульфатных форм. У цинка те же самые формы, что и у марганца, однако доля карбонатных и гидрокарбонатных форм преобладает над аква-ионами.

Химические формы нахождения металлов в подотвальных ручьях разительно отличаются друг от друга, так же, как и различны их физико-химические условия. В Голубом ручье с нейтральным значением pH элементы находятся в виде свободных ионов, гидроксидов, карбонатов и гидрокарбонатов, сульфатов. Al(III) и Fe(III) в ручье находятся исключительно в виде гидроксидных комплексов. Медь и никель в растворе образуют большей частью нейтральные карбонатные комплексы типа MeCO_3^0 , а также примерно в равных долях свободнионные Me^{2+} и сульфатные комплексы типа MeSO_4^0 . Кроме того, медь образует гидроксидные формы в ручье (CuOH^+ и $\text{Cu}(\text{OH})_2^0 \sim 7\%$). Формы бария представлены аква-ионами Ba^{2+} (41 %) и сульфатными комплексами BaSO_4^0 (58 %). В долевом распределении форм Cd, Zn и Mn преобладают свободнионные комплексы, сульфатные и гидрокарбонатные комплексы.

Другая картина наблюдается в кислом Зеленом ручье – до 50 % металлов здесь мигрируют в незакомплексованных формах. Остальная часть представлена связанными, преимущественно сульфатными ионами: нейтральными $\text{CuSO}_4^0(\text{aq})$ и $\text{ZnSO}_4^0(\text{aq})$ и заряженными AlSO_4^+ , AlSO_4^{2-} , $\text{Zn}(\text{SO}_4)_2^{2-}$. Лишь у кадмия и железа (III) дополнительно образуются хлоридные CdCl^+ и гидроксидные FeOH_2^+ , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{4+}$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{3+}$ комплексы.

В зоне смешения этих двух ручьев наблюдается переход Fe(III) в свободнионные и сульфатные комплексы Fe(II). У элементов Al, Ba, Cd преобладающей химической формой становятся сульфатные комплексы. Гидрокарбонатные комплексы появляются у Cu и Zn, однако доля сульфатных и акваионных форм все же больше.

Проследим изменение долевого распределения форм тяжелых металлов вниз по течению реки Блявы до р. Курган (точка 250). Здесь рассматривались две крупные зоны смешения: слияние р. Херсонка с р. Блява (точки 117, 119) и большая общая зона смешения р. Блява и р. Жирикля (точки 279, 281). Для Zn характерно увеличение доли аква-ионов, повышение доли сульфатных форм и уменьшение доли гидрокарбонатных комплексов до слияния с р. Жирикля. Затем наблюдается снижение доли сульфатных комплексов и увеличение гидрокарбонатных. Для железа (III) и алюминия характерны различные гидроксидные комплексы на всем протяжении реки. Химические формы кадмия представлены главным образом аква-ионами, лишь увеличение доли сульфатных комплексов (44 %) на участке, проходящем через зону Медногорского медно-серного комбината (точка 279), меняют их долевое распределение вниз по течению до 50 %.

На всем протяжении реки преобладающими химическими формами свинца являются нейтральные карбонатные комплексы, которые незначительно снижаются при впадении высокосульфатных вод р. Жирикля, образуя сульфатные комплексы и аква-ионы. Для никеля основная доля химических форм приходится на нейтральные карбонатные, однако после слияния с р. Жирикля появляются аква-ионы и сульфатные комплексы. У меди преобладают гидрокарбонатные и гидроксидные комплексы и увеличивается доля аква-ионов (до 15 % в р. Курган). Основными химически-

ми формами бария являются аква-ионы (Ba^{2+}), сульфатные ($BaSO_4^0$) и гидрокарбонатные ($BaHCO_3^+$) комплексы с незначительной долей нейтральных карбонатных ($BaCO_3^0$). Вниз по течению долевое распределение форм сильно не меняется, но резко увеличивается доля сульфатных комплексов, а доля аква-ионов снижается. Нейтральные карбонатные комплексы практически не образуются.

Равновесие природных и техногенных вод с минеральными фазами

Термодинамические расчеты индексов насыщения подотвальных ручьев Блявинского рудника показали, что воды Голубого ручья пересыщены по отношению к ряду гидроксидных минералов алюминия – диаспору $AlO(OH)$, гиббситу $Al(OH)_3$, бёмиту $AlO(OH)$, и к гидроксидам железа в виде ферригидрита $Fe(OH)_3$. Раствор также близкоравновесен к гидроксидам марганца и аморфным гидроксидам алюминия. Кроме того, раствор пересыщен к ряду глинистых минералов и силикатам (рис. 4).

В растворе также возможно образование частиц карбонатов Cu , Mn , Ca , и сульфатных минералов типа алунита, барита, брошантита, а также частиц алюмосиликатов.

В окислительной обстановке Зеленого ручья возможно формирование ярозита разного состава,

а также барита $BaSO_4$, алунита $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$, урбанита Al_0HSO_4 . В равновесии находятся гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и ангидрит $CaSO_4$. Из гидроксидов вероятно выпадение ферригидрита $Fe(OH)_3$, диаспора $AlO(OH)$ (рис. 5).

В зоне смешения подотвальных ручьев наблюдается пересыщение по отношению к оксидам и гидроксидам Fe^{3+} (гётиту и маггемиту). Ферригидрит находится в близко равновесном состоянии с раствором. Индексы насыщения гидроксидов алюминия (диаспор, гиббсит и бёмит) варьируют от $-0,74$ до $-2,5$ (рис. 6), что говорит о том, что раствор недосыщен по отношению к этим минеральным фазам. Индексы насыщения в воде р. Жирикля для гидроксидов и оксидов Al , Fe , Cu колеблются от $+3$ до $-0,5$ (рис. 7). Близко равновесны воды по отношению к аморфному оксиду кремния и отавиту $CdCO_3$, магнезиту, кальциту и доломиту. В воде возможно уже образование взвешенных частиц силикатов $ZnSiO_3$ ($ИН=2,5$).

Термодинамические расчеты вод из р. Блявы перед впадением в нее р. Жирикля показали высокие индексы насыщения по ряду алюмосиликатных фаз. Так, в воде возможно образование взвешенных частиц $ZnSiO_3$, ломонтита $CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 4H_2O$, иллита $K_{0,6}Mg_{0,25}Al_{2,3}Si_{3,5}O_{10}(OH)_2$, галлуазита $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ и бейделлита $(Na,K, \frac{1}{2}Mg)_{0,33}Al_{2,33}Si_{3,67}O_{10}(OH)_2$.

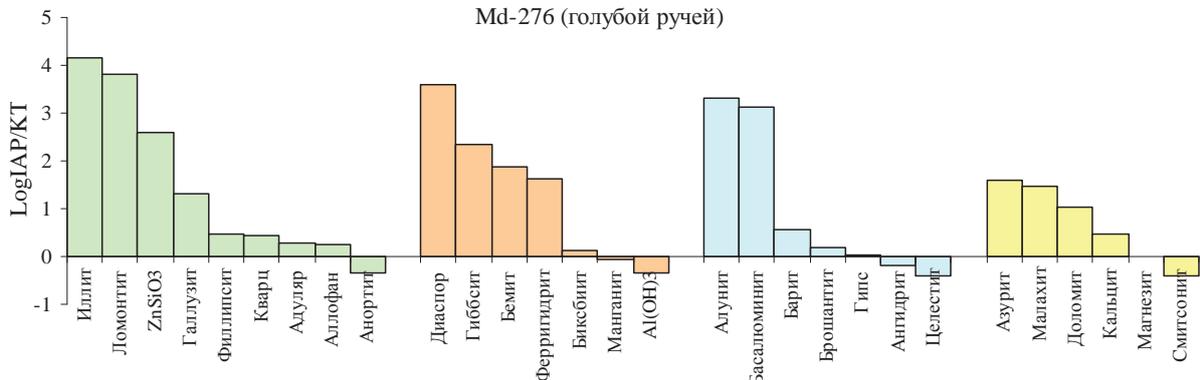


Рис. 4. Индексы насыщения минералов в Голубом ручье

Fig. 4. Saturation indices of minerals in the Goluboy stream

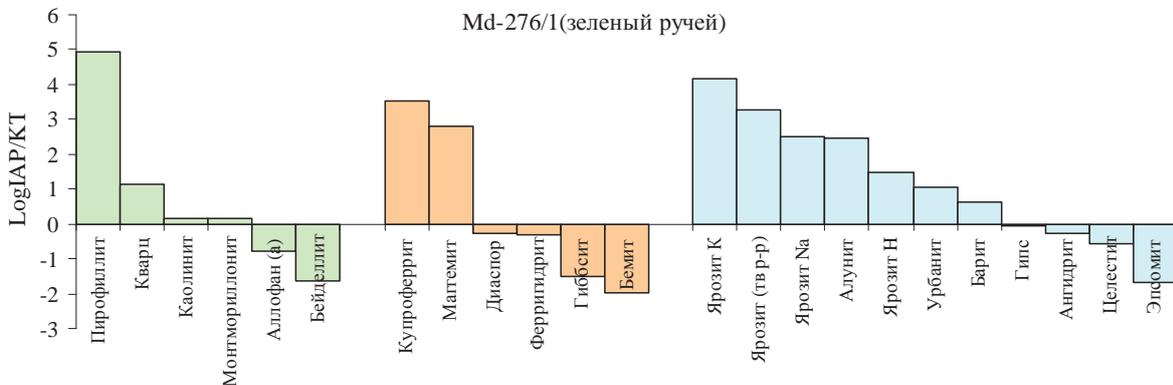


Рис. 5. Индексы насыщения минералов в Зеленом ручье

Fig. 5. Saturation indices of minerals in the Zeleny stream

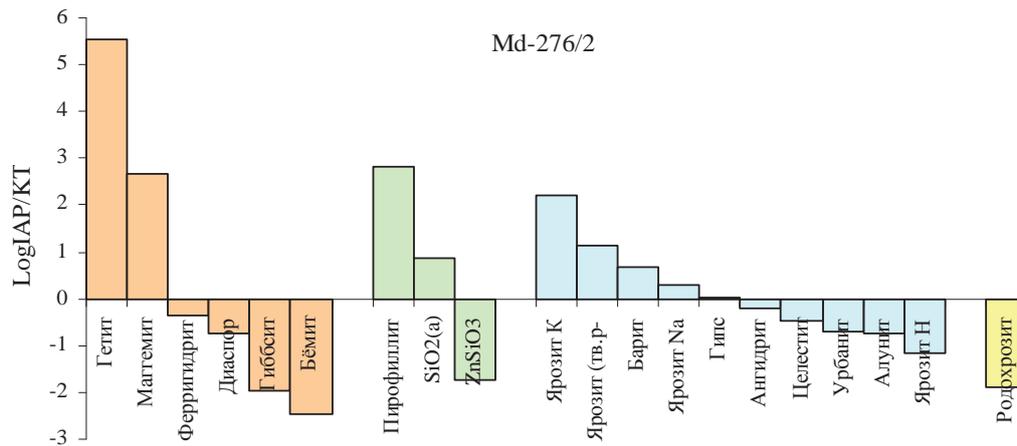


Рис. 6. Индексы насыщения минералов в зоне смешения Голубого и Зеленого ручьев

Fig. 6. Saturation indices of minerals in the mixing zone of Goluboy and Zeleny streams

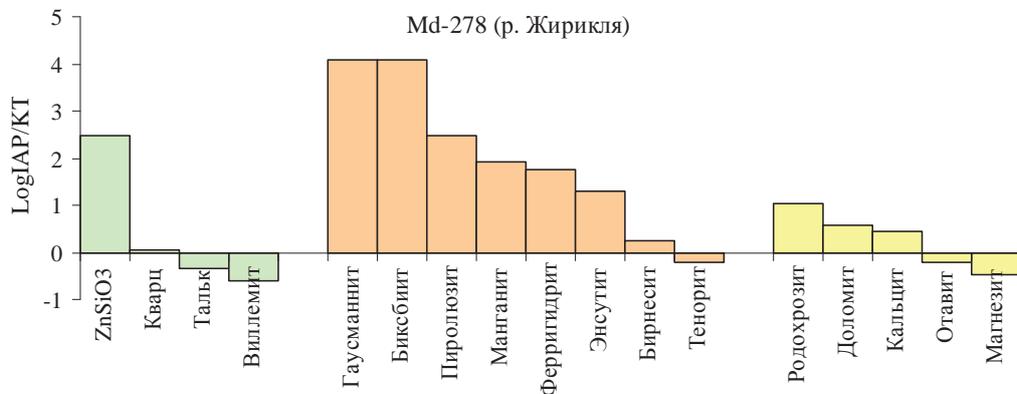


Рис. 7. Индексы насыщения минералов в р. Жирикля

Fig. 7. Saturation indices of minerals in the Zhiriklya River

Из гидроксидов пересыщение раствора наступает по отношению к диаспору, гибситу, бёмиту и ферригидриту. Из сульфатов возможно образование алунита, базальюминита $Al_4(OH)_{10}SO_4$ и барита. Карбонаты в данном случае находятся в недосыщенном состоянии (рис. 8).

Ниже по течению р. Блявы, после впадения р. Жирикля, индексы насыщения по отношению к ряду оксидов и гидроксидов железа и алюминия остаются, как и до впадения. Та же самая ситуация наблюдается и у сульфатных минералов (рис. 9).

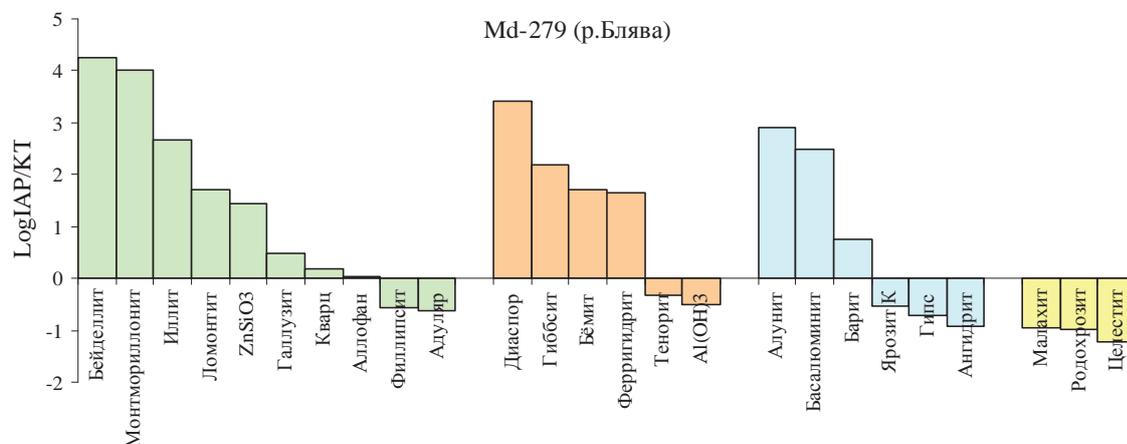


Рис. 8. Индексы насыщения минералов в воде р. Блява

Fig. 8. Saturation indices of minerals in the Blyava River

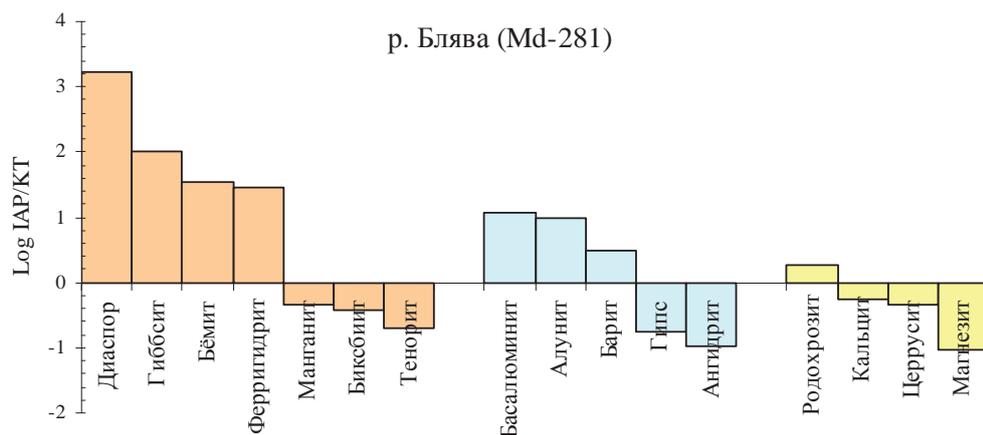


Рис. 9. Индексы насыщения минералов в воде р. Блява после впадения в р. Жирикля

Fig. 9. Saturation indices of minerals in the Blyava River after mixing with Zhiriklya River

Аномалии тяжелых металлов в воде протягиваются на большие расстояния от источника загрязнения с формированием наиболее контрастных ореолов Zn, Cd, Mn, Cu в нижнем течении р. Блява. Для Fe, Cu, Zn, Mn и Cd характерно увеличение концентрации в р. Курган, что связано с недостаточной природной буферизирующей способностью р. Блява. Объяснение обнаруженным фактам можно найти в корреляционных взаимосвязях между элементами. В водах Медногорской ГТС существует высокая корреляция между Al, Fe, Mn и тяжелыми металлами (Cd, Zn, Co, Cu, Pb, Ni). Как показало моделирование, Al, Fe, Mn образуют аморфные гидроксиды, которые могут находиться в виде тончайших коллоидов [23], способных мигрировать в водотоках в виде влекомой взвеси, сорбирующей на себе тяжелые металлы, такие как Cu, Pb и Zn, которая может мигрировать на длинные расстояния до того, как они перейдут в донный осадок [24]. Следует отметить, что параметр pH показал исключительно отрицательную корреляцию со всеми металлами, а электропроводность показала значимую – на уровне 99 % – положительную связь со всеми компонентами. Электропроводность и сульфат-ионы – более достоверные индикаторы антропогенной нагрузки, чем pH или тяжелые металлы. Сульфат-ион является более консервативным анионом в воде, меньше всего подвергаясь процессам сорбции или колебаниям pH, в отличие от тяжелых металлов [25]. Наличие коллоидов подтверждается индексами насыщения минералов, таких как гиб-

сит, базальюминит, урбанит, бёмит в разных точках исследуемой системы. Действительно, в растворах возможно формирование различных гидроксидов и ярозита различного состава, которые неустойчивы при впадении их в р. Жирикля и способны растворяться. Полученные данные свидетельствуют о переходе гётита в ферригидрит в зонах смешения кислого и нейтрального техногенных ручьев и в реках Жирикля и Блява.

Заключение

Определение форм нахождения металлов и индексов насыщения минералов в растворе посредством модельных расчетов может объяснить и дать прогнозную оценку процессам, развивающимся в отвалах действующих и отработанных месторождений. В частности, нахождение металлов Zn и Cu в воде в виде акваионов позволяет предположить, что в данных условиях основным механизмом их осаждения будет сорбция на гидроокислах и/или глинистых минералах, а не формирование нерастворимых вторичных соединений. Образование взвеси минералов и фаз регулируется подвижными физико-химическими условиями и формами нахождения элементов в растворах. Система «минеральная фаза – раствор» в дренажных ручьях и зонах их влияния неустойчива, возможен легкий переход элементов из взвеси в раствор и обратно.

Работа была выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН IX.138.3.1. и при финансовой поддержке гранта фонда Президента РФ № МК-6654.2016.5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dold B. Basic concepts in environmental geochemistry of sulphide mine waste management // Waste Management / Ed. by E.S. Kumar. – Rijeka: In Tech, 2010. – P. 173–198.
2. Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 57. – P. 17–34.
3. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 57. – P. 3–16.
4. Kirillov M.V., Bortnikova S.B., Gaskova O.L. Authigenic gold formation in the cyanidation tailings of gold–arsenopyrite–quartz ore of Komsomolsk deposit (Kuznetski Alatau, Russia) // Environmental Earth Sciences. – 2016. – V. 75. – № 13. – P. 1–11.
5. Favas P.J.C., Pratas J., Gomes M.E.P. Hydrochemistry of superficial waters in the Adoria mine area (Northern Portugal): environmental implications // Environmental Earth Sciences. – 2012. – V. 65. – P. 363–372.
6. Geochemistry of Trace Metals and Rare Earth Elements in Stream Water, Stream Sediments and Acid Mine Drainage from Darrehzar Copper Mine, Kerman, Iran / N. Soltani, F. Moore, B. Keshavarzi, R. Sharifi // Water Quality, Exposure and Health. – 2014. – V. 6. – № 3. – P. 97–114.
7. Kinetics and roles of solution and surface species of chalcopyrite dissolution at 650mV / Y. Li, G., Qian J. Li, A. Gerson // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2015. – V. 161. – P. 188–202.
8. Manders P., Godfrey L., Hobbs P. Acid Mine Drainage in South Africa // Briefing Note 2009/02. CSIR Natural Resources and the Environment: Pretoria. Council for Scientific Research (CSIR).
9. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data / V. Olenchenko, D. Kucher, S. Bortnikova, O. Gasrkova, A. Edelev, M. Gora // Russian Geology and Geophysics. – 2016. – V. 57. – № 4. – P. 617–628.
10. Yurkevich N.V., Saeva O.P., Karin Y.G. Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2015. – V. 97. – № 1. – P. 76–89.
11. Елпатьевский П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. – М.: Наука, 1993. – 253 с.
12. Лубкова Т.Н., Яблонская Д.А., Шестакова Т.В. Геохимические особенности состава поверхностных вод Находкинского медно-порфирового рудного поля, Чукотка // Вода: Химия и Экология. – 2013. – № 12. – С. 29–34.
13. Шварцев С.Л. Внутренняя эволюция геологической системы вода-порода // Вестник РАН. – 2012. – Т. 82. – № 3. – С. 242–251.
14. Acid Mine Drainages from Abandoned Mines: Hydrochemistry, Environmental Impact, Resource Recovery, and Prevention of Pollution / P.J.C. Favas, S.K. Sarkar, D. Rakshit, P. Venkatchalam, M.N.V. Prasad // Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention / Eds. M.N.V. Prasad, K. Shih. – Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sydney; Tokyo: Elsevier – Academic Press, 2016. – P. 413–462.
15. Williams T., Smith B. Hydrochemical characterization of acute acid mine drainage at Iron Duke mine, Mazowe, Zimbabwe // Environmental Geology. – 2000. – V. 39. – № 3–4. – P. 272–278.
16. Geochemical behavior of an acid drainage system: the case of the Amarillo River, Famatina (La Rioja, Argentina) / K. Lecomte, S. Maza, G. Collo, A. Sarmiento, P. Depetris // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – V. 24. – № 2. – P. 1630–1647.
17. Geochemical characterization and heavy metal contamination of groundwater in Satluj River Basin / C. Singh et al. // Environmental Earth Sciences. – 2013. – V. 71. – № 1. – P. 201–216.
18. Jeong C. Mineral-water interaction and hydrogeochemistry in the Samkwang mine area, Korea // Geochemical Journal. – 2001. – V. 35. – № 1. – P. 1–12.
19. Korneeva T., Aminov P., Kucher D. Integrated Geophysical and Geochemical Methods for the Environmental Assessment of Active Smelter Operations and Abandoned Mines in Karabash, Ural Mountains, Russia // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2015. – V. 196. – P. 459–469.
20. Parbhakar-Fox A., Lottermoser B.G. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices // Minerals Engineering. – 2015. – V. 82. – P. 107–124.
21. Ball J., Nordstrom D. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters. – Menlow Park, Calif.: U.S. Geological Survey, 1991. – 188 p.
22. Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralised areas / W.H. Ficklin, G.S. Plumlee, K.S. Smith, J.B. McHugh // Water Rock interaction: Proc. 7 International Symposium / Eds. Y.K. Kharaka, A.S. Maest. – Park City, Utah, 1992. – P. 381–384.
23. Schemel L., Kimball B., Bencala K. Colloid formation and metal transport through two mixing zones affected by acid mine drainage near Silverton, Colorado // Applied Geochemistry. – 2000. – V. 15. – № 7. – P. 1003–1018.
24. Kimball B., Callender E., Axtmann E. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S.A. // Applied Geochemistry. – 1995. – V. 10. – № 3. – P. 285–306.
25. Gray N.F. Acid mine drainage composition and the implications for its impact on lotic systems // Wat. Res. – 1998. – V. 32. – № 7. – P. 2122–2134.

Поступила 07.02.2017 г.

Информация об авторах

Корнеева Т.В., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Юркевич Н.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геофизических систем физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета.

Аминов П.Г. кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории минералогии техногенеза и геоэкологии Института минералогии УрО РАН.

UDC 550.424:622.343.5:622'17

GEOCHEMICAL FEATURES OF MIGRATION FLOWS IN THE IMPACT ZONE OF MINING TECHNOGENESIS (MEDNOGORSK)

Tatyana V. Korneeva¹,
korneevatv@ipgg.sbras.ru

Nataliya V. Yurkevich^{1,2},
yurkevichnv@ipgg.sbras.ru

Pavel G. Aminov³,
aminovp@mail.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Koptug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State Technical University
I-304, 20, K. Marx avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

³ Institute of Mineralogy UB RAS,
Ilmen Reserve Miass, 456317, Russia.

The relevance of the research is caused by large-scale pollution of natural ponds and rivers which occurs at mine drainage, containing elevated concentration of metals, sulphates and other components, run into uncontaminated waters. Assessment of the degree of natural and technogenic waters balance to hydrogenic minerals is currently an urgent problem. Its solution allows describing the nature of the geochemical specifics of technogenic water, and the mechanisms of their formation, identifying the sources of chemical elements and processes of secondary mineral formation, forms of migration of toxic elements in the technogenic streams and their impact on the environment.

The aim of the study is finding-out the regularities of secondary mineral formation in anthropogenic streams as major factor of removal of metals from solutions.

The methods used in the study. Physical and chemical modeling of chemical species in solution was calculated using WATEQ4f code. At the same time the authors have calculated saturation indexes, indicating a potential undersaturation or supersaturation of solution with respect to various mineral phases.

The results. The paper introduces the results of physico-chemical modeling of Mednogorsk geotechnical system with application of the WATEQ4f package. The authors calculated the chemical species of elements and saturation indexes with respect to a number of mineral phases. Various hydroxides and different types of jarosite, which are unstable in the mixing zone with Zhiriklya River and are able to dissolve, can be formed in water samples under study. These findings indicate the transition of goethite to ferrihydrite in the mixing zones of Zeleny and Goluboy mine drainages and in Zhiriklya and Blyava rivers.

Key words:

Mine drainage, saturation index, chemical species, modeling, WATEQ4f, hydrochemistry, technogenic wastes.

REFERENCES

- Dold B. Basic concepts in environmental geochemistry of sulphide mine waste management. *Waste Management*. Ed. by E.S. Kumar. Rijeka, In Tech, 2010. pp. 173–198.
- Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 17–34.
- Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 3–16.
- Kirillov M.V., Bortnikova S.B., Gaskova O.L. Authigenic gold formation in the cyanidation tailings of gold–arsenopyrite–quartz ore of Komsomolsk deposit (Kuznetski Alatau, Russia). *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, no. 13, pp. 1–11.
- Favas P.J.C., Pratas J., Gomes M.E.P. Hydrochemistry of superficial waters in the Adoria mine area (Northern Portugal): environmental implications. *Environmental Earth Sciences*, 2012, vol. 65, pp. 363–372.
- Soltani N., Moore F., Keshavarzi B., Sharifi R. Geochemistry of Trace Metals and Rare Earth Elements in Stream Water, Stream Sediments and Acid Mine Drainage from Darrehzar Copper Mine, Kerman, Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 97–114.
- Li Y., Qian G., Li J., Gerson A. Kinetics and roles of solution and surface species of chalcopyrite dissolution at 650mV. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, vol. 161, pp. 188–202.
- Manders P., Godfrey L., Hobbs P. Acid Mine Drainage in South Africa. Briefing Note 2009/02. *CSIR Natural Resources and the Environment: Pretoria*. Council for Scientific Research (CSIR).
- Olenchenko V., Kucher D., Bortnikova S., Gasrkova O., Edellev A., Gora M. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 4, pp. 617–628.
- Yurkevich N.V., Saeva O.P., Karin Y.G. Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2015, vol. 97, no. 1, pp. 76–89.
- Elpatevskiy P.V. *Geokhimiya migratsionnykh potokov v prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh geosistemakh* [Geochemistry of migration flows in natural and natural-anthropogenic geosystems]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 253 p.
- Lubkova T.N., Yablonskaya D.A., Shestakova T.V. Geokhimeskie osobennosti sostava poverkhnostnykh vod Nakhodkinskogo medno-porfirovogo rudnogo polya, Chukotka [Geochemical

- peculiarities of surface water composition of the Nakhodka porphyry copper ore field J. *Water: Chemistry and Ecology*, 2013, no. 12, pp. 29–34.
13. Shvartsev S.L. Vnutrennyaya evolyutsiya geologicheskoy sistemy voda–poroda [Internal evolution of the geological system water–rock]. *Bulletin of the RAS*, 2012, vol. 82, no. 3, pp. 242–251.
 14. Favas P.J.C., Sarkar S.K., Rakshit D., Venkatachalam P., Prasad M.N.V. Acid Mine Drainages From Abandoned Mines: Hydrochemistry, Environmental Impact, Resource Recovery, and Prevention of Pollution. *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention*. Eds. M.N.V Prasad, K. Shih. Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sydney; Tokyo, Elsevier – Academic Press, 2016. pp. 413–462.
 15. Williams T., Smith B. Hydrochemical characterization of acute acid mine drainage at Iron Duke mine, Mazowe, Zimbabwe. *Environmental Geology*, 2000, vol. 39, no. 3–4, pp. 272–278.
 16. Lecomte K., Maza S., Collo G., Sarmiento A., Depetris P. Geochemical behavior of an acid drainage system: the case of the Amarillo River, Famatina (La Rioja, Argentina). *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 1630–1647.
 17. Singh C., Rina K., Singh R., Mukherjee S. Geochemical characterization and heavy metal contamination of groundwater in Satluj River Basin. *Environmental Earth Sciences*, 2013, vol. 71, no. 1, pp. 201–216.
 18. Jeong C. Mineral-water interaction and hydrogeochemistry in the Samkwang mine area, Korea. *Geochemical Journal*, 2001, vol. 35, no. 1, pp. 1–12.
 19. Korneeva T., Aminov P., Kucher D. Integrated Geophysical and Geochemical Methods for the Environmental Assessment of Active Smelter Operations and Abandoned Mines in Karabash, Ural Mountains, Russia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2015, vol. 196, pp. 459–469.
 20. Parbhakar-Fox A., Lottermoser B.G. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*, 2015, vol. 82, pp. 107–124.
 21. Ball J., Nordstrom D. *User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters*. Menlow Park, Calif, U.S. Geological Survey, 1991. 188 p.
 22. Ficklin W.H., Plumlee G.S., Smith K.S., McHugh J.B. Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralised areas. *Proc. 7th International Symposium. Water Rock interaction*. Eds. Y.K. Kharaka, A.S. Maest. Park City, Utah, 1992. pp. 381–384.
 23. Schemel L., Kimball B., Bencala K. Colloid formation and metal transport through two mixing zones affected by acid mine drainage near Silverton, Colorado. *Applied Geochemistry*, 2000, vol. 15, no. 7, pp. 1003–1018.
 24. Kimball B., Callender E., Axtmann E. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S.A. *Applied Geochemistry*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 285–306.
 25. Gray N.F. Acid mine drainage composition and the implications for its impact on lotic systems. *Wat. Res.*, 1998, vol. 32, no. 7, pp. 2122–2134.

Received: 7 February 2017.

Information about the authors

Tatyana V. Korneeva, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Nataliya V. Yurkevich, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; assistant professor, Novosibirsk State Technical University.

Pavel G. Aminov, Cand. Sc., researcher, Institute of Mineralogy UB RAS.