

УДК 622.17

**КЛАССИФИКАЦИЯ НЕКОНДИЦИОННЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД
И ТЕХНОГЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ
ПО ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРИГОДНОСТИ
К ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ**

А. В. Светлов¹, П. В. Припачкин², В. А. Маслобоев¹, Д. В. Макаров¹

¹*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ “Кольский научный центр РАН”,
E-mail: a.svetlov@ksc.ru, Академгородок, 14а, 184209, г. Апатиты, Россия*

²*Геологический институт ФИЦ “Кольский научный центр РАН”, г. Апатиты, Россия*

Некондиционные медно-никелевые руды и техногенные минеральные образования: вскрышные породы, хвосты обогащения и отвальные шлаки, расположенные на территории Мурманской области, ранжированы по степени потенциальной экологической опасности. Определяющими факторами подвижности тяжелых металлов, образующихся при окислении сульфидов, являются состав нерудных минералов (силикатной матрицы), рН поровых растворов, подверженность воздействию атмосферных агентов выветривания (кислотных дождей). Установлены критерии пригодности природного и техногенного медно-никелевого сырья к переработке геотехнологическими методами.

Арктическая зона Российской Федерации, минерально-сырьевой комплекс, кислотопродуцирующий потенциал, нейтрализующий потенциал, техногенные минеральные образования, сульфидные руды, геотехнологии

DOI: 10.15372/FTPRPI202002015

Мурманская область — регион с крупнейшими предприятиями минерально-сырьевого комплекса Арктической зоны Российской Федерации и страны в целом [1]. Важной технологической, экономической и экологической задачей для горно-металлургических предприятий Арктической зоны РФ является повышение полноты извлечения цветных и благородных металлов из сульфидных руд и широкая разработка техногенных минеральных образований — накопленных и текущих отходов горно-металлургических производств с одновременным снижением нагрузки на окружающую среду [2].

Необходимость использования некондиционного сульфидного медно-никелевого сырья природного и техногенного генезиса обусловлена сокращением запасов богатых легкообогатимых руд. Особенности форм нахождения полезных минералов, высокая степень их дисперсности, изменения физических и физико-химических свойств поверхности — закономер-

Работа выполнена в рамках темы НИР (№ 0226-2018-0001), частично поддержана средствами гранта РФФИ (№ 18-05-60142) Арктика и проекта (№ КО1030) Supporting Environmental, Economic and Social Impacts of Mining Operations Программы Kolarctic CBC 2014–2020 гг.

ные барьеры на пути разработки технологий извлечения цветных металлов, соответствующих требованиям технической эффективности и экономической целесообразности. Применение комбинированных обогатительно-гидрометаллургических технологий, различных энергетических воздействий, новых собирателей позволяет значительно повысить комплексность использования сырья и обеспечить эффективную защиту окружающей среды [2–7; и др.].

Цель настоящей работы — классификация месторождений некондиционных медно-никелевых руд и техногенных минеральных образований на территории Мурманской области по их потенциальной экологической опасности и пригодности к переработке геотехнологическими методами.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве природных объектов исследований рассмотрены забалансовые руды месторождений медно-никелевых руд Мончегорского расслоенного мафит-ультрамафитового плутона (Мончеплутон), расположенного в Мончегорском районе Мурманской области. Среди них донная залежь массива Нитгис-Кумужья-Травяная (НКТ), месторождения Нюд-П, Нюд-Терраса и Морошковое озеро. Техногенные минеральные образования расположены на территории Печенгского района. Это отвалы Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд в п. Приречный, хвосты обогащения медно-никелевых руд промплощадки АО “Кольской ГМК” в г. Заполярный и отвальные шлаки рудно-термической плавки в п. г. т. Никель.

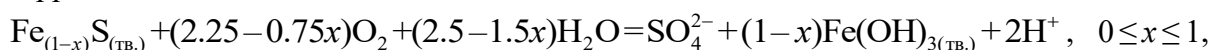
Общая характеристика рассмотренных объектов представлена в табл. 1. Используются данные литературных источников [8–12]. Приведены запасы сырья, содержания цветных металлов, вещественный состав. Видно, что рудные минералы практически на всех объектах идентичны, за исключением отвальных шлаков, где цветные металлы содержатся исключительно в составе одного сульфида (пентландита). Существенные отличия наблюдаются в составе нерудных минералов объектов. Эти отличия определяют не только потенциальную экологическую опасность, но и пригодность объектов к кучному выщелачиванию.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В [13–17; и др.] показано, что основная нагрузка на окружающую среду при разработке сульфидных медно-никелевых месторождений, обогащении и переработке руд и хранении отвальных продуктов происходит вследствие кислого дренажа, который в большинстве случаев сопровождается загрязнением окружающей среды тяжелыми металлами. Для определения потенциальной экологической опасности изучаемых объектов выполнены оценки кислотно-основных потенциалов слагающих их минералов, расчеты балансов между способностью минеральных ассоциаций производить и нейтрализовать кислоту [18–23].

Кислотопродуцирующий потенциал (AP) — величина, соответствующая максимальному количеству кислоты, способной образовываться в результате окисления сульфидов по следующим реакциям [14]:

пирротин —



пентландит —



халькопирит —

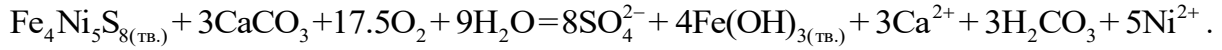
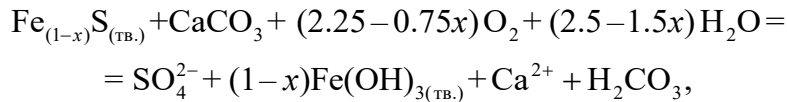


ТАБЛИЦА 1. Общая характеристика объектов

Объект	Запасы	Содержание цветных металлов, %	Минеральный состав	Преобладающие размеры сульфидных сростков, мкм
Некондиционные медно-никелевые руды Мончеплутона				
Месторождение Нюд II	Не известны	Ni (0.37) Cu (0.30)	Рудные: пентландит, халькопирит, пирротин. Нерудные: плагиоклаз, орто- и клинопироксен	40 – 200
Месторождение Нюд Терраса	Ni (31.7 тыс. т)	Ni (0.24) Cu (0.20)	Рудные: пентландит, халькопирит, пирротин. Нерудные: плагиоклаз, орто- и клинопироксен	40 – 200
Месторождение Морошковое озеро	Не известны	Ni (3.88) ¹ Cu (0.86)	Рудные: пентландит, халькопирит, пирротин, магнетит. Нерудные: плагиоклаз, орто- и клинопироксен, амфибол, хлорит	40 – 200
Месторождение НКТ	Ni (30 тыс. т) Cu (20 тыс. т)	Ni (1.04 – 1.52) ² Cu (0.16 – 2.74)	Рудные: пентландит, халькопирит, пирротин, пирит. Нерудные: плагиоклаз, орто- и клинопироксен	40 – 200
Техногенные минеральные образования				
Отвалы Аллареченского месторождения	~ 1 млн т (балансовых и забалансовых руд разных типов, содержащих по укрупненной оценке не менее 5 – 6 тыс. т Ni)	Ni (1.570) ³ Cu (1.340) Co (0.029)	Рудные: пентландит, халькопирит, пирротин, магнетит. Нерудные: плагиоклаз, микроклин, кварц, биотит, мусковит, амфиболы, серпентин, хлорит	20 – 200
Хвосты обогащения медно-никелевых руд	~ 280 млн т	Ni (0.190) Cu (0.070) Co (0.007)	Рудные: пентландит, халькопирит, пирротин, магнетит. Нерудные: оливин, авгит, керсутит, актинолит, серпентин, тальк, хлорит, доломит, кальцит	3 – 20
Отвальные шлаки	~ 50 млн т	Ni (0.16) Cu (0.12)	Пентландит. Оливин, оливиновое стекло	От 1.5 – 2.0 до 20 – 70

^{1,2}Данные относятся к периоду обработки месторождений [8].³Данные относятся к породам рудной массы отвала [12]

Единицей измерения кислотопродуцирующего потенциала считали условное количество карбоната кальция (в килограммах на тонну вещества, ppt), необходимое для нейтрализации кислоты [18]. Для расчетов использовали уравнения реакций:



Для нейтрализации образующейся при окислении 1 моля пирротина кислоты необходим 1 моль кальцита. На каждый грамм серы, входящей в состав пирротина, потребуется 3.125 г CaCO_3 . Отсюда

$$\text{AP} = S_{\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}} (\text{мас.}\%) \cdot 31.25.$$

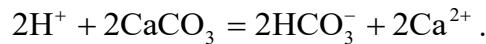
Для нейтрализации образующейся при окислении 1 моля халькопирита кислоты необходим 1 моль кальцита. На каждый грамм серы, входящей в состав халькопирита, потребуется 1.563 г CaCO_3 :

$$\text{AP} = S_{\text{CuFeS}_2} (\text{мас.}\%) \cdot 15.63.$$

Для нейтрализации образующейся при окислении 1 моля пентландита кислоты необходимо 3 моля кальцита. На каждый грамм серы, входящей в состав пентландита, потребуется 1.172 г CaCO_3 :

$$\text{AP} = S_{\text{Fe}_4\text{Ni}_5\text{S}_8} (\text{мас.}\%) \cdot 11.72.$$

Согласно другой методике, расчет количества карбоната кальция, необходимого для нейтрализации кислоты, ведут исходя из того, что в природной среде при pH 7.0–8.5 карбонаты находятся в форме HCO_3^- [21–23]:



В этом случае для нейтрализации образующейся при окислении 1 моля пирротина кислоты необходимо 2 моля кальцита. Тогда максимальный потенциал кислотности

$$\text{MPA} = S_{\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}} (\text{мас.}\%) \cdot 62.50. \quad (1)$$

Соответствующие поправки делаются для расчета гидролиза 1 моля окисленных халькопирита и пентландита.

Ввиду определенной условности предлагаемых подходов, в расчетах принималось, что

$$\text{AP} = S_{\text{sulf}} (\text{мас.}\%) \cdot 31.25, \quad (2)$$

где S_{sulf} — суммарное содержание сульфидной серы всех продуцирующих кислоту минералов в руде (вмещающей породе, хвостах, шлаке).

Нейтрализующий потенциал (NP) рассчитывали для количественной оценки способности вещества нейтрализовать кислые дренажные стоки (AMD), исходя из содержания карбонатных минералов в веществе [18, 21]:

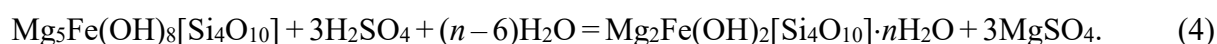
$$\text{NP} = \text{CO}_3^{2-} (\text{мас.}\%) \cdot 16.70. \quad (3)$$

Результирующий кислотопродуцирующий потенциал (NAP) определяется как разность $\text{NAP} = \text{AP} - \text{NP}$ [18–23].

Расчет характеристик некондиционных медно-никелевых руд выполнен на основе анализов отобранных для исследований технологических проб. Эти данные хорошо коррелируют с результатами, приведенными в [24]. Пробы руды, отобранной из отвала карьера месторождения Нюд-П, содержали 2.80 % сульфидной серы и 0.33 % CO_3^{2-} . Месторождение Нюд-Терраса: S_{sulf} — 1.35, CO_3^{2-} — 0.34 %. Месторождение Морошковое озеро: S_{sulf} — 2.20, CO_3^{2-} — 0.31 %. Месторождение НКТ: S_{sulf} — 3.10, CO_3^{2-} — 0.30 %.

При изучении ультраосновных пород Аллареченского района в [25] выделены две разновидности жильных руд (оливин-карбонат-сульфидные и сульфидные). Оливин-карбонат-сульфидные руды не выходят за пределы ультраосновных пород. Они образуют слепые жилы как с резкими контактами, так и с постепенными переходами к густовкрапленным сульфидным рудам. Отличаются гигантозернистым сложением (зерна оливина до 30 см в поперечнике, карбоната — до 20 см, апатита — до 10 см длиной) и обилием в них минералов с летучими (карбонатов и апатита). Текстуры: массивная, брекчиевая и брекчиевидная. Обломки нерудных минералов корродируются сульфидами [25]. По данным [12], весовой вклад ультрабазитов в отвалы оценивается в 11–14 %. Преобладающая часть всей рудной массы отвала сгруппирована во фракционном интервале –150+10 мм. Содержание ультраосновных пород во фракции –150+5 мм составляет ~5 %. Для расчета нейтрализующего потенциала пород отвала прием содержание кальцита равным 0.5 %. Содержание CO_3^{2-} 0.30 %. Породы отвала фракции –150+5 мм содержат 3.5 % серы [12].

Хвосты обогащения медно-никелевых руд текущего производства содержат в среднем 0.7 % сульфидной серы. При расчете NP принимали, что хвосты содержат 1 % кальцита и 0.5 % доломита. Это в большей степени соответствует хвостам обогащения руд из зон метасоматоза [26]. Содержание CO_3^{2-} в этом случае составляет 0.99 %. Отметим, что учет только карбонатов для расчета NP не учитывает других возможных взаимодействий. Как показано в [26], когда силикатная матрица представлена серпентиновыми минералами или хлоритами, реакция может быть следующей:



Реакция (4) проходит не до конца. Лишь отдельные элементарные слои серпентиновых минералов (или хлоритов) переходят в монтмориллонитоподобные, в которых бруситовый слой первичного минерала замещается слоями воды. Новообразованные монтмориллонитоподобные слои беспорядочно чередуются с серпентиновыми или хлоритовыми, образуя смешаннослойные сростки, вследствие чего на рентгенограммах фиксируется нецелочисленная серия базальных рефлексов. Насыщенные водой монтмориллонитоподобные слои имеют толщину несколько большую, чем исходные минералы (соответственно 17 и 14 Å), объем новообразованной твердой фазы превышает объем исходной, что компенсирует уменьшение объема твердой фазы при окислении пирротина. Видимо, поэтому процесс окисления медленно проникает в глубину [26].

Отвальные гранулированные шлаки рудно-термической плавки не содержат карбонатных минералов — кальцита и доломита. В этой связи нейтрализующий потенциал NP шлаков может быть принят равным нулю. Отметим, что когда в составе силикатной матрицы присутствует оливин, вероятно реакция с серной кислотой по схеме [26]:



При этом происходит окисление сульфата железа (II) до сульфата железа (III), при гидролизе которого образуются гидроксиды (гетит или гидрогетит). Серная кислота вступает в реакцию. Гель кремнезема препятствует проникновению агентов выветривания вглубь. Это снижает как скорость дальнейшего окисления сульфидов, так и скорость взаимодействия оливина с кислотой. Вследствие высокой химической активности гель может вступать в реакцию с ионами тяжелых металлов, в первую очередь никеля [26]. Содержание серы сульфидных включений шлаков составляет 0.155 %.

Результаты расчетов по уравнениям (1)–(3) приведены в табл. 2. Здесь же представлены результаты определения pH поровых растворов. Сопоставление AP и NP позволяет дать прогноз состава дренажных вод при хранении отвальных техногенных продуктов.

ТАБЛИЦА 2. Потенциальная экологическая опасность и пригодность к переработке методом физико-химической геотехнологии

Объект	AP	NP	NAP	pH поровых растворов	Потенциальная экологическая опасность	Пригодность к кучному выщелачиванию
Некондиционные медно-никелевые руды Мончеплутона						
Месторождение Нюд II	87.50	5.51	+ 81.99	5.4	Повышенная. AMD, миграция тяжелых металлов	Хорошая
Месторождение Нюд Терраса	42.19	5.68	+ 36.51	7.4	Средняя. AMD, миграция тяжелых металлов	Удовлетворительная
Месторождение Морошковое озеро	68.75	5.18	+ 63.57	5.7	Средняя. AMD, миграция тяжелых металлов	Хорошая
Месторождение НКТ	96.88	5.01	+ 91.87	7.1	Повышенная. AMD, миграция тяжелых металлов	Хорошая
Техногенные минеральные образования						
Отвалы Аллареченского месторождения	109.38	5.01	+ 104.37	4.7	Высокая. AMD, интенсивная миграция тяжелых металлов	Хорошая
Хвосты обогащения медно-никелевых руд	21.88	16.53	+ 5.35	8.1	Умеренная. Нейтрализация AMD, осаждение тяжелых металлов гидросиликатами	Удовлетворительная. Необходима агломерация. Повышенный расход серной кислоты
Отвальные шлаки	4.84	0	+ 4.84	8.0	Умеренная. Нахождение сульфидов в силикатной матрице ограничивает AMD	Удовлетворительная. Необходимы измельчение и агломерация

Сравнение данных расчетов с наблюдениями на реальных природных и техногенных объектах, изучение новообразованных минеральных фаз, моделирование процессов гипергенеза в лабораторных условиях позволило ранжировать объекты по их потенциальной экологической опасности (табл. 1). Отвалы Аллареченского месторождения медно-никелевых руд являются

наиболее экологически опасным объектом. Он характеризуется наличием кислых дренажных стоков и интенсивной миграцией тяжелых металлов. Это подтверждают проведенные натурные и лабораторные исследования [27], а также расчеты [12]. К экологически опасным объектам могут быть отнесены борта карьеров и отвалы месторождения медно-никелевых руд Мончеплутона — Нюд-II и НКТ. Данные объекты характеризуются сопоставимыми с отвалами Аллареченского месторождения значениями результирующего кислотопродуцирующего потенциала NAR: +81.99 и +91.87 соответственно. Для них также характерен кислый дренаж с выносом и миграцией тяжелых металлов.

Другие объекты Мончеплутона (месторождения Морошковое озеро и Нюд-Терраса) отнесены к объектам со средней экологической опасностью. Это обусловлено несколько большим содержанием карбонатных минералов и относительно низкими содержаниями сульфидов. Наконец, два техногенных минеральных образования — хвосты обогащения медно-никелевых руд и отвальные гранулированные шлаки рудно-термической плавки классифицированы как объекты умеренной или даже низкой экологической опасности. Данное обстоятельство определяется низкими содержаниями сульфидов и размерами сульфидных включений.

Рассмотрим объекты с позиций их пригодности к переработке методом физико-химической геотехнологии — кучным выщелачиванием. Нами ранжирована группа хорошо пригодных к кучному выщелачиванию объектов — отвалы Аллареченского месторождения и некондиционные руды месторождений Мончеплутона: НКТ, Нюд-II и Морошковое озеро. Объекты характеризуются относительно высоким содержанием пирротина, продуцирующего серную кислоту, инертностью нерудных минералов, что предопределяет низкий расход кислоты на выщелачивание. Ограничивающие факторы — преобладающие размеры рудных сростков, их раскрытие и проницаемость рудной массы. С целью выявления значимости каждого из факторов необходимы дополнительные эксперименты.

Ко второй группе объектов, удовлетворительно пригодных к кучному выщелачиванию, отнесены руды месторождения Нюд-Терраса и техногенные минеральные образования — хвосты обогащения и отвальные гранулированные шлаки. Общим негативным фактором для них является низкое содержание сульфидов цветных металлов. Для хвостов и отвальных гранулированных шлаков второй общий негативный фактор — низкая крупность сульфидных включений.

Для хвостов обогащения к отрицательным факторам следует отнести их тонкую дисперсность и низкую проницаемость вследствие этого, что предопределяет необходимость агломерации. Кроме того, наличие химически активных нерудных минералов — серпентинов и хлорита предполагает повышенный расход серной кислоты.

Ввиду того, что в шлаках сульфиды находятся внутри гранул из оливинового стекла, вероятны кинетические ограничения процесса выщелачивания, связанные с необходимостью растворения оливина по реакции (5). В этой связи потребуется измельчение гранул и последующая агломерация, что усложнит и сделает процесс затратнее.

ВЫВОДЫ

Выявлена потенциальная экологическая опасность некондиционных медно-никелевых руд, хвостов обогащения и шлаков. Отвалы Аллареченского месторождения характеризуются высокой опасностью (NAR +104.37), руды месторождений НКТ, Нюд-II и Морошковое озеро — повышенной (NAR +91.87, +81.99 и +63.57 соответственно), месторождения Нюд-Терраса — средней (NAR +36.51), хвосты обогащения и отвальные гранулированные шлаки — умеренной (NAR +5.35 и +4.84 соответственно) опасностью.

Определяющими факторами подвижности тяжелых металлов образующихся при окислении сульфидов являются состав нерудных минералов (силикатной матрицы), pH поровых растворов, подверженность воздействию атмосферных агентов выветривания (кислотных дождей).

Исследованные объекты ранжированы по их пригодности к переработке методом физико-химической геотехнологии. Хорошо пригодны к кучному выщелачиванию отвалы Аллареченского месторождения и некондиционные руды месторождений Мончеплутона: НКТ, Нюд-II и Морошковое озеро. Удовлетворительно пригодны к кучному выщелачиванию руды месторождения Нюд-Терраса и техногенные объекты — хвосты обогащения и отвальные гранулированные шлаки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Masloboev V. A., Seleznev S. G., Svetlov A. V., and Makarov D. V.** Hydrometallurgical processing of low-grade sulfide ore and mine waste in the Arctic regions: perspectives and challenges, *Minerals*, 2018, Vol. 8, 436. DOI: 10.3390/min8100436.
2. **Chanturiya V. A.** Innovation-based processes of integrated and high-level processing on natural and technogenic minerals in Russia, *IMPC 2018, 29th Int. Mineral Proc. Congress, Congress Proc. "Ore and Metals"* Publishing House, Moscow, 2019. — P. 3–12.
3. **Nevskaya M. A., Seleznev S. G., Masloboev V. A., Klyuchnikova E. M., and Makarov D. V.** Environmental and business challenges presented by mining and mineral processing waste in the Russian Federation, *Minerals*, 2019, Vol. 9, 445. DOI: 10.3390/min9070445.
4. **Chanturia V. A., Matveeva T. N., Ivanova T. A., and Getman V. V.** Mechanism of interaction of cloud point polymers with platinum and gold in flotation of finely disseminated precious metal ores, *Mineral Proc. and Extractive Metallurgy Review*, 2016, Vol. 37, No. 3. — P. 187–195.
5. **Ростовцев В. И., Кондратьев С. А., Бакшеева И. И.** Совершенствование обогащения медно-никелевых руд на основе энергетических воздействий // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 123–130.
6. **Кондратьев С. А., Гаврилова Т. Г.** Механизм работы физической формы сорбции на примере активации сульфидных минералов ионами тяжелых металлов // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 121–135.
7. **Кондратьев С. А.** Метод выбора структуры и состава углеводородного фрагмента молекулы собирателя // ФТПРПИ. — 2019. — № 3. — С. 87–98.
8. **Бакаев Г. Ф., Поляков И. В., Митюгов В. С., Давыдов П. С., Карпов С. М. и др.** Проект на проведение поисковых работ на металлы платиновой группы в Мончегорском районе (Мончегорский и Мончетундровский массивы). — Мончегорск: ОАО ЦКЭ, 1999. — 279 с.
9. **Гроховская Т. Л., Бакаев Г. Ф., Шолохнев В. В., Лапина М. И., Муравицкая Г. Н., Войтехович В. С.** Рудная платинометалльная минерализация в расслоенном Мончегорском магматическом комплексе (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. — 2003. — Т. 45. — № 4. — С. 329–352.
10. **Волохонский А. Н., Реженова С. А.** Минералогическая оценка шлаков медно-никелевых руд как критерий их практического использования // Минералогические критерии комплексной оценки минерального сырья Кольского полуострова. — Апатиты: КФ АН СССР, 1982. — С. 47–55.
11. **Нерадовский Ю. Н., Савченко Е. Э., Гришин Н. Н., Касиков А. Г., Окорочкова Е. А.** Структура и состав шлаков Печенги: исследования на сканирующем электронном микроскопе // VI Всероссийская Ферсмановская научная сессия. — Апатиты: КНЦ РАН, 2009. — С. 283–286.
12. **Селезнев С. Г.** Отвалы Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд — специфика и проблемы освоения: автореф. дис. ... геол.-мин. наук. — Екатеринбург, 2013. — 23 с.

13. **Doyle F. M.** Acid mine drainage from sulphide ore deposits, Sulphide deposits — their origin and processing, Institute Mining and Metallurgy, 1990. — P. 301–310.
14. **Walder I. F. and Schuster P. P.** Acid rock drainage, Environmental geochemistry of ore deposits and mining activities, SARB Consulting Inc., Albuquerque, New Mexico, 1997. — P. 4.1–4.26.
15. **Lottermoser B. G.** Mine wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010. — 400 p.
16. **Sheoran A. S., Sheoran V., and Choudhary R. P.** Geochemistry of acid mine drainage: a review, Environment. Res. J., 2010, Vol. 4. — P. 293–320.
17. **Tao Chen, Bo Yan, Chang Lei, and Xianming Xiao.** Pollution control and metal resource recovery for acid mine drainage, Hydrometallurgy, 2014, Vol. 147–148. — P. 112–119.
18. **Sobek A. A., Schuller W. A., Freeman J. R., and Smith R. M.** Field and laboratory methods applicable to overburden and mine soils, 1978, US EPA 600/2-78-054.
19. **Гаськова О. Л., Бортникова С. Б.** К вопросу о количественном определении нейтрализующего запаса вмещающих пород // Геохимия. — 2007. — № 4. — С. 461–464.
20. **Skousen J., Simmons J., McDonald L. M., and Ziemkiewicz P.** Acid-base accounting to predict post-mining drainage quality on surface mines, J. Environmental Quality, 2002, Vol. 31, No. 6. — P. 2034–2044.
21. **Abrosimova N., Gaskova O., Loshkareva A., Edelev A., and Bortnikova S.** Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu-Mo deposit, J. Geoch. Exploration, 2015, Vol. 157. — P. 1–14.
22. **Саева О. П.** Взаимодействие техногенных дренажных потоков с природными геохимическими барьерами: автореф. дис. ... геол.-мин. наук. — Новосибирск, 2015. — 18 с.
23. **Karlsson T., Räisänen M. L., Lehtonen M., and Alakangas L.** Comparison of static and mineralogical ARD prediction methods in the Nordic environment, Environmental Monitoring and Assessment, 2018, Vol. 190, 719. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7096-2>.
24. **Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение.** — Апатиты: КНЦ РАН, 2004. — Ч. 1. — 177 с.
25. **Зак С. И., Кочнев-Первухов В. И., Проскуряков В. В.** Ультрасосновные породы Аллареченского района, их метаморфизм и оруденение / Тр. Ин-та геологии КФ АН СССР. Вып. 12. — Петрозаводск: Карелия, 1972. — 129 с.
26. **Чантурия В. А., Макаров В. Н., Макаров Д. В.** Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья. — Апатиты: КНЦ РАН, 2005. — 218 с.
27. **Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В.** Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 138–153.

Поступила в редакцию 07/XI 2019

После доработки 11/II 2020

Принята к публикации 10/IV 2020