

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ТИПА «ОТВАЛЫ АЛЛАРЕЧЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ» (ПЕЧЕНГСКИЙ РАЙОН МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)

Болтыров В. Б., Селезнев С. Г., Стороженко Л. А.

На примере техногенного объекта «Отвалы Аллареченского месторождения» (Печенгский район Мурманской области) показаны масштабы загрязнения окружающей среды, которое могут создавать отходы горнодобывающих предприятий в местах их накопления. Описаны процессы изменения химического и минералогического состава руд, приводящие не только к деградации окружающей среды, но и к значительному обесцениванию техногенного объекта как источника минеральных ресурсов.

Ключевые слова: техногенный объект; горнопромышленные отходы; сульфидные медно-никелевые руды; магнитная сепарация; техногенная нагрузка; деградация экосистемы; инфляция запасов.

Техногенный объект (ТО) «Отвалы Аллареченского месторождения» расположен в Печенгском районе Мурманской области и представляет собой отвал горных пород, образованный отходами добычи коренного Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд. Разработка месторождения велась открытым способом и была завершена в 1971 г. [1]. Основными добываемыми полезными ископаемыми являлись никель, медь и кобальт.

В процессе эксплуатации месторождения образовались новые формы рельефа. Это карьер площадью в верхней части 1000 × 300 м и глубиной более 75 м, который в настоящее время затоплен; кроме того сформирован отвал, превышение абсолютных отметок которого над окружающим рельефом составляет около 50 м, а общий объем пород оценивается в 6,7 млн м³ (более 12 млн т). Также значительно изменился гидрологический режим местности (было перенесено русло реки Алла). После завершения эксплуатации карьер, отвалы и нарушенные земли были заброшены.

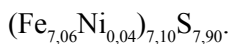
Породы отвала представлены вскрышными, преимущественно безрудными гнейсами, гранито-гнейсами, амфиболитами и в разной степени оруденелыми вмещающими породами: перидотитами, оливинитами, контактовыми амфиболитами и др. Состав мелкозернистой фракции определяют раздробленные

в процессе взрывных работ вмещающие и вскрышные породы, в том числе вскрышные четвертичные флювиогляциальные и озерно-ледниковые отложения. Гранулометрический состав пород отвала весьма неравномерен и характеризуется следующими усредненными параметрами: (–2000+500 мм) – 5–15 %; (–500+300 мм) – 15–25 %; (–300+150 мм) – 25–35 %; (–150+5 мм) – 25–30 %; (–5 мм) – 10–15 %.

Руды отвала представлены двумя типами – массивными (сплошными) и вкрапленными. Основными рудными минералами обоих типов являются пирротин, пентландит и реже халькопирит, которые находятся в тесной парагенетической связи с магнетитом.

Доминирующим концентратом никеля в руде является пентландит. Его средний химический состав, определенный по данным микронзондовых анализов, в массивных рудах: Ni – 35,3; Fe – 30,8; Co – 0,7; S – 33,2; сумма – 99,9; формула: $(\text{Ni}_{4,65}\text{Fe}_{4,26}\text{Co}_{0,08})_{8,99}\text{S}_{8,00}$; во вкрапленных: Ni – 34,1; Fe – 32,0; Co – 0,6; S – 33,0; сумма – 99,7; формула: $(\text{Ni}_{4,50}\text{Fe}_{4,44}\text{Co}_{0,08})_{8,02}\text{S}_{8,98}$.

Относительно небольшая доля никеля приходится на пирротин. Его средний химический состав, определенный по данным микронзондовых анализов, в массивных рудах: Fe – 60,1; Ni – 0,3; S – 39,5; сумма – 99,9; формула: $(\text{Fe}_{6,98}\text{Ni}_{0,03})_{7,01}\text{S}_{7,99}$; во вкрапленных: Fe – 60,6; Ni – 0,3; S – 38,9; сумма – 99,8; формула:

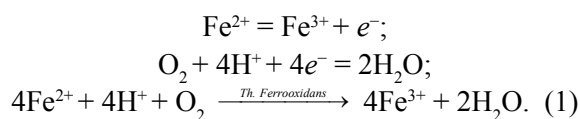


Медь сконцентрирована преимущественно в составе тетрагонального халькопирита. Химический состав этого минерала практически одинаков во всех рудах и отвечает стехиометрии $(\text{Cu,Fe})\text{S}_2$: Cu – 34,6; Fe – 30,4; S – 35,0; сумма – 100.

Единственным концентратором кобальта в рудах является пентландит. И пентландит, и пирротин весьма неустойчивы в условиях гипергенеза. В сростаниях образуют гальваническую пару, в которой пентландит (у которого электродный потенциал выше) исполняет роль анода. В результате в первую очередь происходит окисление моноклинного пирротина как одного из наименее устойчивых минералов сульфидных руд. Низкая устойчивость моноклинного пирротина обусловлена его кристаллохимическими особенностями. Хотя эта разновидность пирротина имеет структуру, аналогичную троилиту и гексагональному пирротину, соотношение атомов Fe и S существенно ниже 1:1 и составляет 7:8. Нестехиометрическая формула сульфида объясняется дефектами структуры – уда-

лением части атомов железа. Упорядоченное размещение вакансий приводит к понижению симметрии минерала и появлению у него магнитных свойств. Процесс окисления пирротина протекает с образованием свободной серной кислоты, которая действует как на сам пирротин, так и на ассоциирующие с ним минералы, в частности, пентландит.

Электрохимические реакции многократно ускоряются и усиливаются присутствием в рудах бактерий *Th. Ferrooxidans*, основой обеспечения жизнедеятельности которых является их способность к окислению (переводу) оксида железа (Fe^{2+}) в оксид (Fe^{3+}). Реакции осуществляются в соответствии со схемой:



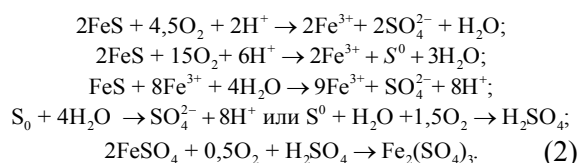
Бактерии *Th. Ferrooxidans* характерны не только для руд отвалов Аллареченского месторождения. Они достаточно распространены и в других медно-никелевых месторождениях арктической зоны Кольского полуострова [2] (табл. 1).

Таблица 1

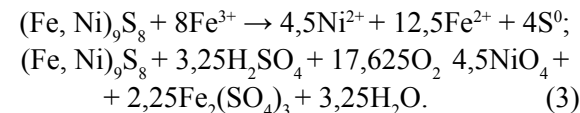
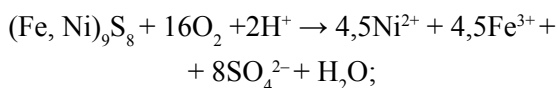
Распространенность бактерий *Th. Ferrooxidans* в рудах медно-никелевых месторождений Кольского полуострова

| Месторождения | Температура проб, °C | pH растворов | Eh растворов | Количество клеток в 1 г руды |
|----------------|----------------------|--------------|--------------|----------------------------------|
| Каула | 2–4 | 7–8 | – | 0–10 ² |
| Ниттис-Кумужье | 2–4 | 6–8 | 0,20–0,40 | 0–10 ³ |
| Нюд | 2–4 | 2,4–2,8 | – | 10 ³ –10 ⁴ |

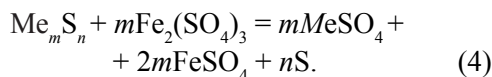
В соответствии с формулой (1) реакция биологического окисления пирротина протекает по вероятной схеме [3]:



Реакция биологического окисления пентландита дополняется реакциями по схеме:

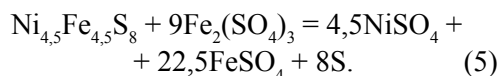


В свою очередь, образуемый в процессе данных реакций сульфат оксида железа также является сильным окислителем сульфидов и взаимодействует с ними по известной реакции:



В соответствии с формулой (4) распад пентландита осуществляется по следующей

реакции:



В обычных условиях получаемый в результате этой реакции сульфат оксида железа (Fe^{2+}) в кислых растворах очень медленно окисляется до сульфата оксида железа (Fe^{3+}), но в присутствии микроорганизмов скорость его окисления увеличивается в десятки тысяч раз, что намного ускоряет процесс разрушения сульфидов.

Следует отметить, что процесс выщелачивания сульфидной массы отвалов не прекращается даже в зимний период, о чем свидетельствует образование проталин в снегу, из которых выделяется пар.

В результате окисления значительная часть сплошных руд отвалов потеряла свои первоначальные свойства. Так, если в богатых разновидностях первичных руд коренного Аллареченского месторождения содержания полезных компонентов достигали: Ni – 18 %, Cu – 8 %, Co – 0,3 %, то в отвалах в их окисленных аналогах максимальные обнаруженные содержания не превышают Ni – 3,3 %, Cu – 2,0 %, Co – 0,05 %.

В результате химических изменений в рудах появляются также характерные гипергенные минералы, такие как ковеллин (CuS), самородная медь, виоларит, ретгерсит ($a\text{-Ni}[\text{SO}_4] \times 6\text{H}_2\text{O}$) и подобные ему.

Обращает на себя внимание постоянное присутствие в рудах виоларита. Его средний химический состав, по данным микрозондовых анализов, соответствует (масс. %): Fe – 21,0; Ni – 35,3; Co – 0,8; S – 42,6, что отвечает формуле $(\text{Ni}_{1,52}\text{Fe}_{1,14}\text{Co}_{0,04})_{3,00}\text{S}_{4,00}$. О гипергенном происхождении этого минерала свидетельствует очень близкий для пентландита показатель соотношения Ni/Co, что говорит о замещении пентландита виоларитом. Кроме того, под электронным микроскопом виоларит часто наблюдается в сростках с гетитом ($a\text{-FeOOH}$) и обладает многочисленными трещинами, что свидетельствует о дефиците объема в результате выноса железа.

Особо отмечается повсеместное распространение ретгерсита, который образует хорошо заметные сине-зеленые натёки на вмещающих породах. Он частично аккумулируется в мелкозернистой фракции, а также, вследствие своей легкой растворимости, выносится вместе с атмосферными осадками и паводковыми водами в нижние горизонты и за пределы отвалов.

Показательны результаты тестирования наличия водорастворимых минералов в мелкозернистой ($-3+0$ мм) фракции в пробе с содержаниями никеля – 0,36 %, меди – 0,41 %, серы – 1,57 %. Тестирование длилось в течение трех часов при постоянном перемешивании воды, имеющей температуру 95 °C (табл. 2).

Таблица 2

Результаты тестирования наличия водорастворимых минералов, содержащихся в мелкозернистой ($-3+0$ мм) фракции

| № | Измельчение | Выход нерастворимого остатка, % | Eh, mB | pH | Конечный раствор | | | Извлечение в раствор, % | | |
|---|-------------|---------------------------------|--------|------|------------------------------|----------------------|----|-------------------------|------|----|
| | | | | | Плотность, г/см ³ | Концентрация, г/литр | | | Ni | Cu |
| | | | | | | Ni | Cu | Fe | | |
| 1 | Нет | 98,5 | 373 | 3,11 | 1,003 | 0,127 | – | 0,05 | 14,5 | – |
| 2 | Да | 98,1 | 359 | 3,43 | 1,002 | 0,063 | – | 0,046 | 6,7 | – |

Из приведенных данных видно, что в количественном отношении сульфаты никеля в классе крупности $-3+0$ мм аккумулируют в себе не более 14,5 % от общего никеля. Но,

учитывая, что этот класс по объему составляет около 10 % всего отвала, а также принимая во внимание повсеместное распространение ретгерсита в крупнозернистой фракции, сле-

дует ожидать, что не менее 3–5 % общего никеля ТО представлено его сульфатами.

Обращает на себя внимание отсутствие водорастворимых (сульфатных) форм меди в тестовых опытах, что однозначно указывает на более интенсивную способность к окислению и растворению никеля в сравнении с медью.

Таким образом, очевиден вывод, что пентландит, основной полезный минерал, содержащийся в отвалах, в силу своей неустойчивости в гипергенных процессах одновременно является доминирующим источником загрязнения окружающих территорий никелем.

С целью определения уровня и ареалов загрязнения участка расположения ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» в 2010 г. был проведен экологический мониторинг, позволивший оценить состояние местных экосистем и направление максимальной миграции токсичных веществ. В процессе работ по мониторингу опробовались поверхностные воды, мох (*Pleuroziumschreberi*) и верхний органогенный почвенный горизонт (A_0).

Анализ поверхностных вод позволил выявить загрязненность всех водоемов, расположенных в непосредственной близости к

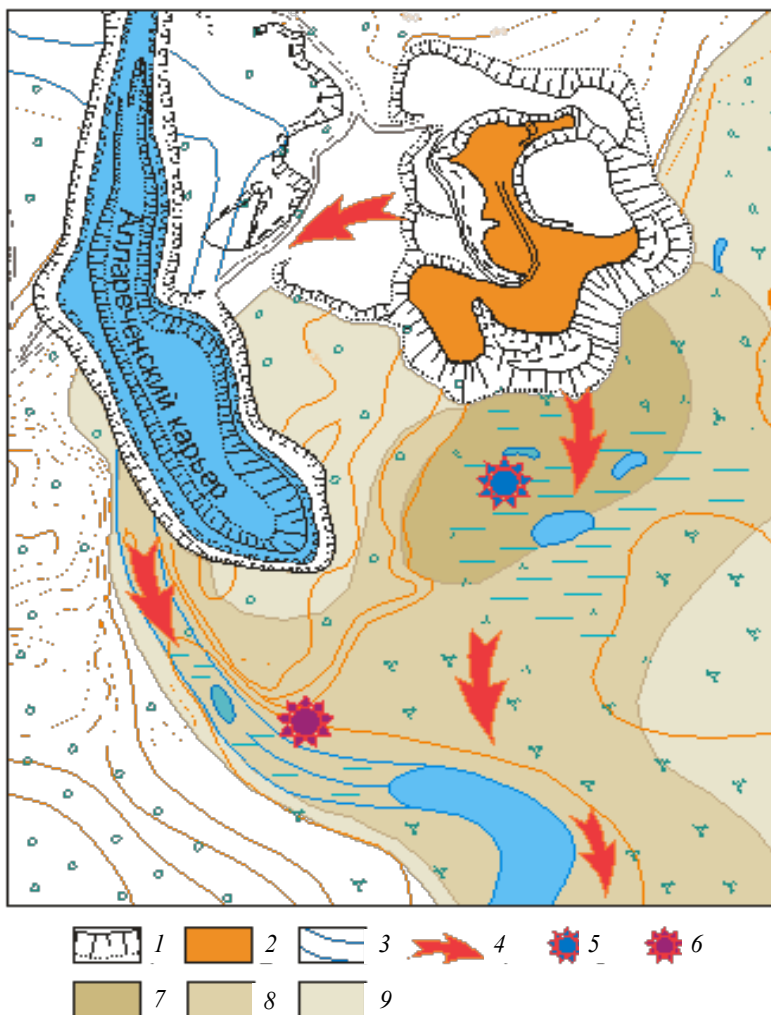


Рис. 1. Ситуационный план ТО «Отвалы Аллареченского месторождения»: 1 – границы кровли и подошвы ярусов отвала; 2 – рудосодержащий участок отвала; 3 – бывшее русло р. Аллы; максимальное выявленное загрязнение: 4 – поверхностных вод; 5 – почвенно-растительного слоя; степень деградации экосистем: 6 – техногенная пустошь; 7 – прогрессирующая деградация; 8 – слабая степень деградации; 9 – преобладающие направления потоков поллютантов

отвалам, никелем (превышение ПДК в 3–79 раз). Также во всех водоемах нарушено соотношение распределений главных ионов,

характерное для вод пресных озер. Особенно загрязнено болото, примыкающее к отвалам с южной стороны (рис. 1), в котором концент-

рации Ni превышают ПДК в 4736 раз; Cu – в 1,2 раза; Co – в 5,3 раза; Mn – в 5,5 раз; аниона $(SO_4)^{2-}$ – в 1,8 раза; содержание Cd при этом почти критическое. Вода в болоте имеет кислую среду (рН = 3,65).

Вода затопленного карьера оказалась менее загрязненной, чем предполагалось (превышение ПДК никеля в 38 раз). Однако из-за отсутствия специального оборудования был опробован лишь поверхностный слой, и послойное глубинное картирование не проводилось. С большой уверенностью можно утверждать, что общее загрязнение указанного водоема во много раз больше, о чем свидетельствует сине-зеленый цвет содержащейся в нем жидкости. Кроме того, нижние горизонты затопленного карьера не являются проточными, вследствие чего концентрации тяжелых металлов (в том числе сульфатов) с глубиной увеличиваются во много раз. Но даже если использовать данные результатов анализов содержания никеля в поверхностном слое (0,75 мг/л), то элементарные расчеты показывают, что воды карьера аккумулируют в себе не менее 5,5 т растворенного никеля.

Не менее загрязненными оказались почвы. Так, в верхнем органогенном почвенном горизонте болота, расположенного с южной стороны отвала, выявленные концентрации тяжелых элементов превысили условно-фоновые показатели¹: Ni – в 877 раз, Cu – в 227 раз, Co – в 61 раз. Но наибольшее загрязнение было отмечено на достаточном удалении от отвала, в левом берегу бывшего русла р. Аллы (рис. 1). Превышения концентраций поллютантов в этом месте в сравнении с условно-фоновыми показателями составили: Ni – в 1172 раза, Cu – в 123 раза, Co – в 233 раза.

Результаты химического анализа образцов мха *Pleuroziumschreberi* участка не выявили значительного превышения условно-фоновых содержаний, характерных в целом для района расположения отвала.

Тот факт, что мхи и лишайники концентрируют в себе химические элементы из сухих и мокрых атмосферных осадков (в результате чего используются в качестве биоиндикаторов атмосферного загрязнения), указывает, что загрязнение участка обусловлено только длительным воздействием ядовитых стоков отвала. При этом направление миграции поллютантов контролируется формами рельефа и осуществляется вдоль старого русла р. Аллы. В связи с этим возникает угроза загрязнения крупнейшей водной артерии Кольского полуострова – р. Тулома.

В результате техногенной нагрузки на прилегающих к отвалу территориях наблюдается прогрессирующая деградация экосистем. Некоторые участки превратились в техногенную пустошь (рис. 2, 3). При этом площадь пострадавших территорий значительно превышает площадь подошвы самого отвала.

Таким образом, если на начальном этапе хранения горнопромышленных отходов типа «Отвалы Аллареченского месторождения» их ещё можно перерабатывать с финансовой выгодой, то с течением времени потребительская ценность полезных компонентов таких объектов становится ниже себестоимости их извлечения, они превращаются в источник постоянного негативного воздействия на окружающую среду.

В случае с ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» можно подсчитать экологический ущерб и ущерб от инфляции запасов.

В настоящее время около 3–4 % или 200–250 т (с учетом ресурсов и запасов) общего никеля ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» представлено его сульфатами, которые можно отнести к потерям технологического характера при обогащении руд традиционными способами, например флотацией.

Несложно произвести расчет количества Ni, который успел элиминировать на нижние горизонты и за пределы отвалов в период их хранения.

¹ Условно-фоновые показатели приняты по данным обследования 610 разрезов горизонта A_0 подзолов на Кольском полуострове и соседней территории Финляндии и Норвегии.

За период эксплуатации Аллареченского месторождения в отвалы с различными типами руд поступило не менее 5–6 тыс. т Ni и

2,3–2,8 тыс. т Cu при среднем соотношении их в руде (2,0–2,3):1. Однако в отвалах Аллареченского месторождения соотношение



Рис. 2. Прогрессирующая деградация экосистемы: почти полное отсутствие напочвенного покрова

Ni:Cu нарушено и меняется от 5,9–2,5 в классах –150+40 мм до 1,35–1,5 в классе –40+10 мм, составляя 0,9–0,3 в классе –10 мм. Это свидетельствует об избирательном выщелачивании Ni в сравнении с Cu]. При этом средневзвешенное содержание Cu в классе –10 мм составляет 0,53 %, что существенно выше среднего её содержания в отвалах: 0,33 % в балансовых блоках и 0,1 – 0,18 % в участках забалансовых руд.

Учитывая, что класс крупности –10 мм составляет 20–30 % от объема отвальной массы, нетрудно подсчитать, что в нем аккумулируется не менее 40 % всей меди, вывезенной в отвалы при эксплуатации Аллареченского месторождения, или 0,9–1,1 тыс. т. Следовательно, учитывая природное соотношение Ni и Cu, класс –10 мм должен был аккумулировать не менее 1,9–2,4 тыс. т Ni. Однако в реальности его запасы в этом классе ниже, чем запасы Cu.

Таким образом, в результате гипергенных

процессов не менее 1,2–1,3 тыс. т (5-я часть запасов) никеля в виде его сульфатов и окислов были элиминированы за пределы отвалов или в его нижние горизонты.

Средняя цена никеля на Лондонской бирже цветных металлов LME, сложившаяся в 2014 г., составляет 15880 долл. за 1 т [4]. В результате оцененный ущерб от инфляции запасов ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» за сорокалетний период его хранения составляет около 20 млн долл., или около 600 млн руб.

Экологический ущерб можно оценить в соответствие с Методикой, утвержденной Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды [5], по формуле:

$$Y = Y_{уд}^{отх} K_i^0 V_{отх} \quad (6)$$

где $Y_{уд}^{отх}$ – показатель удельного ущерба от размещения 1 т отходов, который рассчитывается по формуле:

$$y_{уд}^{отх} = \frac{H_c S K_3^n + Y_{уд}^a M^a K_3^a}{V_{отх}}, \quad (7)$$

где H_c – норматив стоимости освоения земель, руб./га; S – площадь мест организованного захоронения отходов, га; K_3^n – коэффициент экологической значимости почв и земельных ресурсов для конкретного экономического района РФ; $Y_{уд}^a$ – показатель удельного ущерба атмосферному воздуху; M^a – приведенная масса выбросов загрязняющих веществ, усл. т; K_3^a – коэффициент экологической значимости атмосферного воздуха для конкретного

экономического района РФ; $V_{отх}$ – объем отходов, размещенных в местах организованного захоронения, т; K_i^o – коэффициент, учитывающий класс опасности отхода.

Для ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» коэффициенты, рассчитанные в соответствии с данной методикой, равны: $Y_{уд}^{отх} = 115,6$ руб. (в ценах 1999 г.); $K_i^o = 2,5$ как для сульфидсодержащего отхода II–III классов опасности.

Таким образом, в соответствие с формулой (6), почвам и земельным ресурсам участка ТО «Отвалы Аллареченского месторожде-



Рис. 3. Полное отсутствие напочвенного покрова (техногенная пустошь)

ния» в результате размещения этого объекта нанесен ущерб в размере: $115,6 \times 2,5 \times 1$ 2млн т = 3,5 млрд неиндексир. руб.

Помимо рассчитанных прямых ущербов следует упомянуть о косвенных ущербах, не поддающихся подсчету. В их числе, например, бюджетный и социальный ущерб, вызванный сокращением запасов ТО; ущерб от повышенного уровня заболеваемости населения, связанного с хранением горнопромышленных отходов; ущерб биологическим

ресурсам и рыбному хозяйству и др.

Таким образом, с позиций синергетики все объекты размещения горнопромышленных отходов являются ярко выраженными прогрессивно самоорганизующимися диссипативными структурами. Процессы гипергенных изменений, заключающиеся в системе многочисленных окислительно-восстановительных реакций с закономерной энергетической направленностью, приводят к физическому разрушению пород, электро-

химическому и биохимическому преобразованию минералов, заметно ухудшающих качество первоначальных руд, а также перераспределению полезных компонентов, которые элиминируют в окружающие территории, превращаясь в поллютанты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селезнев С. Г., Степанов Н. А. Отвалы Аллареченского сульфидного медно-никелевого месторождения как новый геолого-промышленный тип техногенных месторождений // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 32–40
2. Яхонтова Л. К. Основы минералогии гипергенеза: учеб. пособие / Л. К. Яхонтова, В. П. Зверева. Владивосток: Дальнаука, 2000. 331 с.
3. Адамов Э. В., Панин В. В. Биотехнология металлов: курс лекций. М.: Изд. Дом МИСиС, 2008. 153 с.
4. Центральный металлический портал РФ. URL: <http://metallischekiy-portal.ru/index-cen-lme>
5. Методика определения предотвращенного экологического ущерба. М., 1999.
6. Селезнев С. Г. Отвалы Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд – специфика и проблемы освоения: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 2013. 23 с.

Болтыров Владимир Босхаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: glzchs@mail.ru

Селезнев Сергей Геннадьевич – кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог. 184420, Мурманская область, пгт. Никель, Гвардейский просп., 6/1, офис 6, ООО «Монолит». E-mail: glzchs@mail.ru

Стороженко Любовь Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: stor_luba@mail.ru