

УДК 622.772:553.4

Рассказова Анна Вадимовна

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: annbot87@mail.ru

**МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ
БЕДНЫХ ЗОЛОТОМЕДНЫХ РУД****Аннотация:*

Рассмотрено применение различных перколяционных методов для переработки золотомедных руд. Описаны технологические подходы к выщелачиванию низкосортных и некондиционных золотомедных руд (кучное, в том числе биовыщелачивание, выщелачивание из отвалов некондиционных руд). К снижению технологических показателей приводит низкая проницаемость кучи, образование промоин рабочими растворами реагентов. Охарактеризован механизм капиллярного и гравитационного взаимодействий в системе реагент – слой руды. Приведены способы решения технологических сложностей, возникающих в процессе перколяционного выщелачивания золотомедных руд (введение антискалантов, поверхностно-активных веществ, 3-D мониторинг кучи современными методами). Приведены технологические параметры и основные характеристики методов выщелачивания, показатели извлечения полезных компонентов, достигаемые в реальных производственных условиях.

Образование серной кислоты в результате окисления сульфидных минералов отвалов горных пород требует проработанного экологического подхода к защите водных и почвенных ресурсов. Приоритетными направлениями развития технологий перколяционного выщелачивания для извлечения золота и меди из низкосортных руд являются экономическая и технологическая эффективность и экологическая безопасность.

Ключевые слова: кучное выщелачивание, низкосортные руды, золотомедные руды, перколяционное выщелачивание

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.122

Rasskazova Anna V.

Candidate of Engineering Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Mining FEB RAS,
680000, Khabarovsk, 51 Turgenev Str.,
e-mail: annbot87@mail.ru

**METHODS OF ENRICHMENT
OF POOR GOLD-COPPER ORES***Abstract:*

The paper describes the application of various percolation methods for processing the gold-copper ores and the technological approaches to leaching the low-grade and substandard gold-copper ores (heap leaching, including bioleaching, leaching from dumps of substandard ores). Low permeability of heap and formation of washouts by working reagent solutions leads to decrease of technological parameters. The paper has characterized the mechanism of capillary and gravitational interactions in the reagent – ore layer system. The author has presented the methods for solving the technological difficulties arising in the process of percolation leaching of gold-copper ores (introduction of antiscalants and surface-active substances, 3-D heap monitoring by modern methods). The paper describes the technological parameters and basic characteristics of the leaching methods as well as the degrees of useful component extraction achieved in real production conditions.

Sulphuric acid formation as a result of oxidation of sulphide minerals from rock dumps requires a well-developed environmental approach to the protection of water and soil resources. Priority directions to develop the technologies of percolation leaching for extraction of gold and copper from low-grade ores are economic and technological efficiency and ecological efficiency security.

Key words: heap leaching, low-grade ores, gold-copper ores, percolation leaching

Введение

Исторически Россия – крупнейшая горнодобывающая страна с наиболее значительными ресурсами недр. Даже после сокращения минерально-сырьевой базы в результате развала СССР она занимает ведущие позиции по запасам практически всех основных видов полезных ископаемых. Однако качество подавляющего большинства этих запасов ниже, чем в добывающих странах-конкурентах [1].

* Работа выполнена при поддержке проекта президиума ДВО РАН № 18-2-015

Экономика России напрямую зависит от добывающей промышленности. Добывающая промышленность – прогрессивная отрасль, именно благодаря ей происходит ускорение научно-технического прогресса в народном хозяйстве страны. Рост потребности в минеральных ресурсах при снижении их качества является общемировым трендом. Мировое производство золота в 2016 г. составило 7,4 т [2]. Для успешного роста добычи и производства цветных и драгоценных металлов необходима разработка технологий добычи и переработки низкосортных руд. Метод перколяционного выщелачивания эффективен для извлечения из низкосортных руд металлов, которые не могут быть извлечены другими методами с учетом экономических соображений.

К методам перколяционного выщелачивания относят кучное выщелачивание, выщелачивание из отвалов (некондиционных руд) и био-выщелачивание. В странах с интенсивно развивающимся производством данные технологии интенсивно внедряются в промышленность последние несколько десятилетий в основном для извлечения золота, меди, редкоземельных элементов и урана.

Перколяционное выщелачивание — это селективное извлечение металла с применением специальных реагентов, которые просачиваются сквозь слой рудного массива или штабель дробленой руды. Методы перколяционного выщелачивания обычно делятся на кучное, выщелачивание вскрышных и некондиционных отвалов и выщелачивание окомкованной мелочи в куче. В табл. 1 указаны технологические параметры и основные характеристики вышеперечисленных методов [3].

Таблица 1

Технологические параметры и основные характеристики методов выщелачивания [3]

Метод выщелачивания	Размер частиц, мм (P_{80})	Дробление	Агломерация	Орошение, л/м ² *ч	Высота кучи, м	Продолжительность выщелачивания, лет	Извлечение, %
Кучное (КВ)	5–100	да	в большинстве случаев	2–15	2–10	Cu: 1–4 Ni: 1–5 U: 1–3 Au: 0.1–2	40–97
Отвал	30–1000	нет	нет	2–15	8–75	Cu: >10 Au: 2–6	20–85
Подземное	>1000	возможно подземное взрывание	не применяется	широко варьируется	не применяется	Cu: >5 U: 1–3	5–50
Чановое	0,5–10	да	может применяться	10–50	1–5	4–30 days	80–97
Окомкованная мелочь (КВ)	0,25–1	доизмельчение применяется при необходимости	да	2–15	1–5	Cu: 1–4 Ni: 1–5 U: 1–3 Au: 0.1–2	70–97

Кучное выщелачивание – метод в гидрометаллургии, который наименее экономически чувствителен к низкосортным и забалансовым рудам по сравнению с другими обогащательными методами. Дробленая (-25 мм) и/или окомкованная руда укладывается в штабель, и раствор рабочего реагента подается на вершину кучи. Под действием силы тяжести раствор проходит через слой руды и продуктивный раствор, обогащенный из-

ввлекаемым металлом, собирается в накопительные прудки у основания кучи. Кучное выщелачивание, как правило, неразрывно связано с жидкостной экстракцией и электролизом для последующего извлечения металла. Таким образом, кучное выщелачивание – относительно простой и экономичный процесс для извлечения металлов из отвалов низкосортных и забалансовых руд, хвостов обогащения и комплексных руд.

Тем не менее процесс извлечения целевых компонентов при кучном выщелачивании длительный и по времени проигрывает другим обогащательным методам, таким как пенная флотация с последующим обжигом концентрата. Однако капитальные затраты данного метода низкие, что является привлекательным.

Биовыщелачивание схоже с традиционным кучным выщелачиванием, но помимо рабочих растворов для вскрытия и окисления минеральной матрицы применяются бактерии (например, для вторичных сульфидов меди). Выщелачивание ценных компонентов из отвалов низкосортных и забалансовых руд (а также вскрыши) характеризуется низкими показателями извлечения вследствие промывки каналов рабочими растворами или быстрым прохождением потока реагентов сквозь рядовую руду.

Подземное выщелачивание предусматривает поступление рабочего раствора в массив горной породы через закачную скважину и прохождение рабочего раствора через рудную массу с приемлемой проницаемостью. Продуктивный раствор извлекается с помощью откачных скважин для последующего извлечения из них целевых металлов.

Производство меди и золота

Продуктами переработки медных руд являются медный концентрат (полученный жидкостной экстракцией и электролизом), катодная медь (производится из обожженных концентратов и методом электрорафинирования). Доля кучного выщелачивания в мировом производстве золота составила 17 % в 2014 г. Данный показатель вырос на 9,6 % (236 т) с 2004 г.

Кучное выщелачивание меди. Кучное выщелачивание обеспечивало 16 % производства меди по всему миру в 2014 г. Основные мощности по кучному выщелачиванию меди расположены в Чили. В Китае рудные [4] месторождения меди разрабатываются в основном открытым способом и делятся на порфировые (41 %), скарновые (27 %), морские вулканогенные (9 %), сульфидные медно-никелевые (6 %) и другие (17 %). Большинство медных месторождений ассоциировано с золотом (76 %) и серебром (32,5 %). Среднее содержание меди составляет 0,87 %, что не позволяет применять традиционные обогащательные методы для таких низкосортных руд.

Биовыщелачивание меди. Кучное биовыщелачивание меди является оптимальным методом переработки при определенном минералогическом составе. Медное месторождение Zijinshan расположено в Юго-Западной части Китая и считается крупнейшим месторождением, содержащим вторичные сульфиды. Среднее содержание меди – 0,38 %. Медь ассоциирована со следующими минералами: ковеллит (CuS , 36,6 %), дигенит ($\text{Cu}_{1,8}\text{S}$, 47,2 %), энаргит (упорный минерал меди – Cu_3AsS_4 , 15 %), курамит (Cu_3SnS_4 , 1,1 %), халькопирит (CuFeS_2) и халькоцит (Cu_2S). Пустая порода представлена кварцем (64,2 %), алунином (11,67 %) и дискитом (15,24 %).

Первоначально были проведены полупромышленные испытания биовыщелачивания меди с последующей жидкостной экстракцией и электролизом. В промышленном масштабе ширина кучи составила 44 м, высота – 6 – 8 м, продолжительность цикла составила 30 – 180 суток при плотности 12–16 л/м²*час. Второй слой кучи был сформирован на первом, и был запущен следующий цикл выщелачивания. Окончательная высота кучи составила 24 м, общий объем – 0,2 млн м² [5].

Формирование кучи производилось из дробленой руды (80 % класса минус 40 мм), окомкование не применялось. В отличие от стандартных систем выщелачивания меди, которые требуют присутствия кислорода, принудительное нагнетание кислорода не применялось на данном объекте как следствие присутствия вторичных сульфидов

меди. Руда на данном месторождении выщелачивается при экстремальных условиях по сравнению с другими производствами по биовыщелачиванию меди (повышенная температура рабочего раствора 45 – 60 °С и температура более 60 °С внутри кучи, высокая кислотность раствора рН 0,85–1,1, низкий окислительно-восстановительный потенциал 700–760 мВ, низкая активность микроорганизмов). Тем не менее при данном режиме обеспечивается 80 % извлечения за 180 – 200 суток без принудительной аэрации кучи интенсивным выщелачиванием халькоцита, дигенита и ковеллита. При окислении пирита также выделяется теплота, серная кислота и железо (50 г/л) [5].

Выщелачивание меди из отвалов. Месторождение Dexing разрабатывается открытым способом. За все время работы карьера было накоплено 500 – 600 млн т низкосортной сульфидной вскрыши и забалансовой руды с содержанием меди 0,1 – 0,3 %. Таким образом, в отвалах содержится 1,2 млн т меди [6].

В горной массе отвалов в среднем содержится 0,45 % первичных сульфидов меди (халькопирит), 0,028 % вторичных сульфидов меди, 0,0068 % свободных оксидов меди и 0,0052 % связанных оксидов меди. Метод выщелачивания из отвала оказался предпочтительным для извлечения меди из-за низких капитальных затрат и стоимости энергетических ресурсов.

Породный отвал размещен вдоль реки, и его площадь составила 7,6 км². Высота отвала около 150 м, что превышает стандартную высоту для данного вида выщелачивания. Угол откоса, который составил около 70°, может повлечь разрушение отвала вследствие размыва.

Для породы, в которой содержится 0,12 % меди (ассоциированной с халькопиритом), достигается извлечение в 17 %. Извлечение удалось повысить до 30 % после ряда экспериментов на производстве. Так как отвал сооружен из рядовой руды, а не из дробленой и окомкованной, текущее извлечение ниже 10 %. Отвал характеризуется неоднородностью гранулометрического состава от мелочи до валунов (2 – 1000 мм). Частицы распределяются по крупности, уплотняются в процессе формирования кучи, что приводит к сегрегации частиц и неравномерной проницаемости. Соответственно, плохая и неравномерная проницаемость обуславливает образование промывочных каналов между частицами и снижает извлечение меди. Микроорганизмы (*Acidithiobacillus*) способствуют интенсификации процессов извлечения меди, но колонии *Acidithiobacillus* обнаруживаются в куче в малом количестве (ниже 10⁴ клеток/мл). Концентрация меди в продуктивном растворе была низка и составляла 0,3 – 0,45 г/л [7]. Повышению извлечения меди может способствовать закисление среды выщелачивания рН=1,8–2, введение питательной среды для бактерий, снижение продолжительности цикла выщелачивания и меры, направленные на аэрацию кучи и повышение ее проницаемости для растворов.

Кучное выщелачивание золота. Кучное выщелачивание цианидами применялось для низкосортной руды (0,34 г/т Au, 0,08 % Cu) на одном из порфировых месторождений Китая. Извлечение золота составляло 65 – 75 % до оптимизации параметров выщелачивания, продолжительность цикла выщелачивания составила 77 – 92 суток. После исследования таких параметров, как размер частиц (50 – 80 мм), строения кучи, ее высоты и расхода орошения была проведена максимизация эффективности извлечения. В учет также принималась проницаемость кучи, сформированной из окисленных руд. Высокое содержание глинистых частиц (8 – 30 %) в руде способствует снижению проницаемости кучи, что обусловило высоту кучи 2 м (по сравнению с общепринятой высотой 8 – 10 м). Извлечение золота увеличилось до 80 %, и продолжительность цикла выщелачивания снизилась. Таким образом, оптимизация параметров кучного выщелачивания приводит к увеличению извлечения полезного компонента. Важным также является экологический аспект загрязнения окружающей среды вследствие утечек токсичных реагентов при кучном выщелачивании. Для рекультивации требуются существенные средства (например, в месторождение Zijin в Китае было инвестировано 2,5 млрд юаней в 2016 г. для рекультивации водных и почвенных ресурсов) [8].

Сложности перколяционного выщелачивания в промышленности

В настоящее время в горной промышленности наблюдается снижение качества руды, увеличение глубины шахт при подземной разработке, трудная обогатимость минерального сырья, необходимость минимизации воздействия на окружающую среду и рекультивация. Все вышеперечисленные сложности связаны с повышением расходов и решением сложностей при выборе и оптимизации системы разработки, методов обогащения и металлургической обработки. Перколяционное выщелачивание широко используется для переработки низкосортной руды; основными факторами, влияющими на извлечение, являются тип руды, гранулометрический состав, минералы пустой породы, размер кучи, ее проницаемость, продолжительность выщелачивания и среда выщелачивания (геология месторождения и гидрогеологические факторы при подземном выщелачивании).

Вторичные сульфиды меди с высоким содержанием пирита и минералами с низким потреблением кислоты приводят к низким уровням pH продуктивного раствора (pH=0,85) и высокому содержанию ионов железа при биовыщелачивании. Это создает проблемы при последующей жидкостной экстракции и электролизе, например, повышенное потребление энергии. Так как именно выщелачивание пирита ведет к повышению содержания железа в продуктивном растворе, возможно введение бактерий в кучу для контроля данного процесса, в результате чего происходит образование ярозита. Однако образование ярозита, в свою очередь, приводит к снижению проницаемости кучи. Введение известняка к рафинату снижает уровень серной кислоты и концентрацию ионов железа. Также применяется двухступенчатая жидкостная экстракция с выделением на первом этапе железа, а на последующем – меди.

Водный баланс также сложный вопрос для засушливых регионов. В таких случаях применяется оборотная вода для жидкостной экстракции. Кислый продуктивный раствор, богатый медью, перерабатывается с помощью мембраны. Очищенная вода направляется на жидкостную экстракцию. Также испарения с поверхности кучи при кучном выщелачивании могут быть причиной потери воды в цикле.

Рабочие растворы выщелачивания, применяемые в промышленности, являются ненасыщенными и состоят из жидкости, подаваемой наверх кучи при орошении, и воздуха. Поток жидкости между частицами находится в переходной области между капиллярной и гравитационной составляющей потока (масштаб порядка миллиметра), тогда как внутри частицы доминирует капиллярный поток (масштаб порядка десятков микрон). Поток реагента в куче усложнен не только благодаря своей ненасыщенности, но и вследствие различных масштабов пор системы (разница меж- и внутризерновых свободных пространств приводит к различным механизмам потока). Распределение жидкости на вершине кучи неравномерное, как показывает практика, и жидкость движется по наиболее легкому пути сквозь частицы в куче. Данный эффект известен как возникновение промоин; он приводит к неэффективной доставке реагентов и растворенных ионов ко всем областям кучи, что приводит к низким содержаниям целевого компонента в продуктивном растворе [3].

Решением данной проблемы может быть мониторинг состояния кучи с применением компьютерной томографии, основанной на анализе изображений, и рентгеновской томографии [9]. Окисленные минералы меди могут сопровождаться высоким содержанием иловой фракции, что может стать большой проблемой для проницаемости кучи. Снижение высоты кучи (с 4-х до 2 – 2,5 м) и доли мелких частиц (до содержания не более 8 %) приводит к приемлемой проницаемости кучи и минимизирует образование промоин.

При окислении сульфидных минералов в составе горных отвалов вскрышных и некондиционных руд образуется серная кислота. В свою очередь, потоки серной кислоты внутри штабеля приводят к выщелачиванию тяжелых металлов и элементов, таких как

цинк, медь, кадмий, свинец, кобальт, никель, мышьяк, сурьма и селен, и загрязнению ими воды вдобавок к вымыванию сульфатов [10].

Результаты вышеуказанных процессов рассматриваются как основные загрязнители почв и воды, связанные с хранением отвалов горных пород.

Новые технологии в перколяционном выщелачивании

Уровень извлечения металлов при кучном выщелачивании зависит от микропор, трещин и доступа выщелачивающих растворов через них к минеральным зернам. Мельница высокого давления (high pressure grinding rolls, HPGR) способствует формированию микротрещин в руде в большей степени по сравнению с другими механизмами измельчения [11]. Несмотря на распространенность мельниц высокого давления в горной промышленности в течение последних десятилетий, их применение для подготовки руды к кучному выщелачиванию в настоящее время ограничено. Применение микроволновой предварительной обработки руды перед кучным выщелачиванием способствует повышению удельной поверхности и пористости обрабатываемого материала. Взрывная и взрыво-инъекционная подготовка к выщелачиванию также способствует повышению пористости, трещиноватости руды, и, как следствие, повышает извлечение целевого компонента в продуктивный раствор [12 – 13].

Вопрос утилизации кеков выщелачивания может быть решен с помощью применения отработанных штабелей в качестве закладочного материала при подземной разработке полезных ископаемых [14]. Возможно смешение кеков выщелачивания со строительными отходами.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ): жирные кислоты и метил-сульфонатовый сложный эфир, додецилсульфат натрия, Т-80 могут быть применены для повышения проницаемости кучи в перколяционном выщелачивании. Например, додецилсульфат натрия увеличивает коэффициент проницаемости почти в 5 раз (на 12 %). Среди прочих ПАВ [59] додецил бензен сульфат, цетилтриметил бромид аммония, полиокиэтилен октилфеноловый эфир (OP-10), Тритон X-100 (TX-100) и FSO (неионогенный фосфоркарбонатный ПАВ) снижали поверхностное натяжение, но не оказывали положительного эффекта на извлечение. Рекомендовано применение антискалантов (ингибиторов образования осадков) для минимизации снижения проницаемости кучи [15].

Например, происходит осаждение карбонатов кальция при щелочном выщелачивании и сульфатов кальция – при кислотном. Введение хелатообразующих агентов и полимерных органических соединений также эффективно при кислотном выщелачивании для снижения содержания соединений железа, алюминия и кальция, образующих осадки. Принудительная аэрация кучи применяется в кучном выщелачивании сульфидных минералов для улучшения кинетики выщелачивания. Пульсационное введение воздуха в кучу схоже по влиянию с пульсационной подачей реагента, улучшает проницаемость кучи и снижает эффект туннелирования потоков реагента. Также имеются данные по улучшению проницаемости кучи варьированием циклов принудительной аэрации. Безусловно, важна государственная и нормативная поддержка во внедрении эффективных технологий подземного и биовыщелачивания. Необходима также поддержка экологически ориентированных технологий и строгий контроль за воздействием горноперерабатывающих производств на окружающую среду. Кучное выщелачивание меди и золота характеризуется меньшим потреблением воды на тонну руды, чем традиционное флотационное обогащение сульфидных руд [16].

Заключение

В данной статье были рассмотрены методы перколяционного выщелачивания, применяемые для переработки бедных и некондиционных золотомедных руд. Биовыщелачивание больше подходит для руд, содержащих вторичные сульфиды. Типичными тех-

нологическими сложностями, связанными с применением методов перколяционного выщелачивания, являются снижение проницаемости штабеля для рабочих растворов и образование промоин потоками выщелачивающего реагента. Проблемой экологического характера является образование серной кислоты в результате окисления сульфидных минералов отвалов горных пород. Поэтому необходимым элементом технологии является охрана поверхностных и подземных вод, а также почв от загрязнения. Рекультивационные мероприятия также являются неотъемлемой частью геотехнологий. Важным аспектом является бережное отношение к ресурсам. В отвалах некондиционных и вскрышных пород золотомедных руд заключены большие запасы цветных и драгоценных металлов. Технически возможно и экономически выгодно извлекать их методом перколяционного выщелачивания. Дальнейшие направления развития технологий перколяционного выщелачивания связаны с внедрением передовых научных разработок в производственную практику и оптимизацией эффективности извлечения полезных компонентов.

Литература

1. Борецкий Е.А. Горнодобывающая промышленность в России / Е.А. Борецкий, М.С. Егорова // Молодой ученый. — 2015. — № 11, 4. — С. 45 - 47. [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL <https://moluch.ru/archive/91/20133/> (дата обращения: 05.03.2019).
2. Zijin Release 2016 Annual Results: [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.zijinmining.com/investors/117576.htm> (дата обращения: 24.02.2018).
3. John, L.W. The art of heap of heap leaching-the fundamentals / L.W. John // Proceedings of Percolation Leaching: The Status Globally and in South Africa. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2011. – P. 17 - 20.
4. Yin, S. Copper bioleaching in China: review and prospect / S. Yin, L. Wang, E. Kabwe, X. Chen, R. Yan, K. An, L. Zhang, A. Wu // Minerals. – 2018. – 8. [Электронный ресурс] — Режим доступа: 10.3390/min8020032.
5. Ruan, R. Bacterial heap-leaching: practice in Zijinshan copper mine / R. Ruan, J. Wen, J. Chen // Hydrometallurgy. – 2006. – 83. – P. 77 - 82.
6. Wu, A. Technological assessment of a mining-waste dump at the Dexing copper mine, China, for possible conversion to an in situ bioleaching operation / A. Wu, S. Yin, H. Wang, W. Qin, G. Qiu // Bioresour. Technol. –2009. – 100. –P. 1931 - 1936.
7. Liu, J.-S. Bacterial oxidation activity in heap leaching / J.-S. Liu, H.-B. Xia, Z.-H. Wang, Y.-H. Hu // J. Central South Univ. Technol. – 2004. – 11. – P. 375 - 379.
8. Ilankoon, I. M. S. K. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities / I.M.S.K. Ilankoon, Y. Tang, Y. Ghorbani, // Minerals Engineering. – 2018. – 125. – P. 206 - 222.
9. Lin, Q. Use of x-ray Computed Microtomography to Measure the Leaching Behaviour of Metal Sulphide Ores, PhD thesis Imperial College London, UK. – 2015.
10. W.A.M. Fernando, I.M.S.K. Ilankoon, T.H. Syed, M. Yellishetty Challenges and opportunities in the removal of sulphate ions in contaminated mine water: a review // Miner. Eng. - 117 (2018). - P. 74 - 90.
11. Ghorbani, Y. Investigation of particles with high crack density produced by HPGR and its effect on percolation in the course of heap leaching / Mainza, A.N., Petersen, J., Becker, M., Franzidis, J.-P., Kalala, J.T. // Proceedings of Comminution 2012, 8th International Comminution Symposium. - April 17–20. - 2012, Cape Town, South Africa.
12. Секисов А.Г. Перспективы использования шахтного выщелачивания при разработке золоторудных месторождений / А.Г. Секисов, Ю.С. Шевченко, А.Ю. Лавров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 116 - 123.

13. Секисов А.Г. Перспективные способы взрывной подготовки руд к шахтному выщелачиванию / А.Г. Секисов, В.А. Хакулов, Ю.С. Шевченко // Новые технологии в науке о Земле и горном деле: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – 2013. – С. 58 - 63.
14. Chen, Q. Backfilling behaviour of a mixed aggregate based on construction waste and ultrafine tailings / Q. Chen, Q. Zhang, C. Xiao, X. Chen // PLoS One. – 2017. – P. 1 - 15.
15. Chen, Q. Surfactant study on promoting leaching rate of uranium / Y. Lü, J. Lü, J. Zhou, J. Shen// Chin. J. Rare Metals. – 2016. – 40 (2). – pp. 182-187.
16. Northey, S.A. Evaluating the application of water footprint methods to primary metal production systems / S.A. Northey, N. Haque, R. Lovel, M.A. Cooksey// Miner. Eng. – 2014. – 69. – P. 65 - 80.