

УДК 504.55.054:622(470.6)

## ОХРАНА ПРИРОДНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ УТИЛИЗАЦИЕЙ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

**Голик Владимир Иванович,**

д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии разработки месторождений Северо-Кавказского государственного технологического университета, Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. E-mail: v.i.golik@mail.ru

**Разоренов Юрий Иванович,**

д-р техн. наук, проф., ректор Северо-Кавказского государственного технологического университета, Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. E-mail: yiri1963@mail.ru

**Масленников Станислав Александрович,**

канд. техн. наук, доцент, зав. каф. строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства, Россия, 346500, г. Шахты, пр. Ленина, 1. E-mail: MaslennikovSA@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью предотвращения деградации природной геологической среды в районе горных работ путем безотходной утилизации накопленных эксплуатацией месторождений техногенных отходов добычи и переработки полезных ископаемых.

**Цель работы:** доказательство возможности и целесообразности безотходного извлечения металлов и солей из хвостов переработки руд до уровня норм санитарной безопасности новыми методами, например методом механохимической активации.

**Методы исследования:** лабораторные исследования в дезинтеграторной установке ДЕЗ-11 по комплексной программе и методике, включающей: исследование хвостов, выщелачивание металлов реагентами в перколяторах, комбинированное выщелачивание металлов реагентами в дезинтеграторе; интерпретация результатов опытов в форме логарифмической или полиномиальной интерполяции и математическое описание; моделирование параметров механохимической активации; статистическая обработка данных на основе множественного регрессионного и корреляционного анализа с реализацией алгоритмов в программной среде MATLAB.

**Результаты.** Выявлены новые закономерности извлечения металлов из хвостов переработки руд цветной и черной металлургии и углеобогащения в зависимости от переменных параметров процесса переработки. Доказано, что метод механохимической активации позволяет извлекать металлы из хвостов до безопасного уровня, что позволит предотвратить катастрофическую деградацию природных геологических ландшафтов. Предложена эколого-экономико-математическая модель для оценки рекомендуемой технологии извлечения металлов из хвостов переработки руд с расчетом эколого-экономического эффекта вариантов вовлечения некондиционного минерального сырья в производство.

**Выводы.** Степень деградации природных геологических ландшафтов понижается путем радикальной утилизации хранящихся на земной поверхности хвостов добычи и переработки руд. Извлечение металлов из хвостов добычи и переработки руд до безопасного уровня обеспечивается переработкой методом механохимической активации. Безотходная утилизация хвостов добычи и переработки руд обеспечивает экономический эффект за счет вовлечения в производство некондиционного минерального сырья для получения товарной продукции.

### Ключевые слова:

Геологический ландшафт, разработка, месторождение, обогащение, хвосты, металлы, утилизация, экономика, экология, доход, технология, механохимия.

### Введение

Влияние продуктов горного производства на геологические ландшафты Земли осуществляется отторжением площадей земли, пылевым и газовым загрязнением экосфер Земли, снижением биологической продуктивности культур, деградацией флоры и фауны и др. способами. В качестве агентов наиболее опасны тяжелые металлы, продуцирующие токсичные компоненты.

Методы предотвращения негативного воздействия горного производства на окружающую среду недостаточно эффективны и не компенсируют причиняемый ущерб. Мероприятия типа биологической рекультивации опасны, так как интенсифицирует производство химически опасных мобильных продуктов [1].

Варианты обращения с хвостами переработки минерального сырья включают в себя:

- хранение с использованием мер защиты окружающей среды;
- переработка с частичным уменьшением опасности.

Условие эколого-экономической эффективности переработки хвостов:

$$P_y > Y_c + Z_n,$$

где  $P_y$  – прибыль при утилизации хвостов;  $Y_c$  – штрафы за нанесение ущерба окружающей среде в денежном выражении;  $Z_n$  – затраты на переработку хвостов.

Утилизация хвостов считается нерентабельной, потому что большая доля ущерба окружающей среде в виде оплаты потери трудоспособности,

рекреационных мероприятий и т. п. перекладывается на общество, в том числе людей, не имеющих отношения к горному производству. Заражение земли продуктами природного выщелачивания хвостов снижает качество земли и показатели соседствующего сельскохозяйственного производства.

Учитывая срок существования хвостохранилищ – столетия, ущерб от хранения хвостов нередко превосходит ценность добытого продукта. Продукты утилизации хвостов обогащения: промышленные продукты, концентраты, кварцевый флюс, становятся сырьем для производства товарных продуктов: силикатные кристаллические изделия, кислотоупорные, износостойкие и химически стойкие продукты, плиты, термостойкие и декоративные материалы и др.

Наибольшую проблему современного горного предприятия составляет негативное изменение природных геологических ландшафтов в процессе образования зон влияния горных работ, в том числе [2]:

- зона локализации полезных ископаемых;
- промежуточная зона, в которой концентрация полезных ископаемых мала;
- зона обитания, в пределах которой сосредоточено живое вещество.

Зона локализации чаще всего представляет собой обводненный комплекс ограниченной мощности, расположенный между водоупорными слоями. Биологические объекты в этой зоне представлены только микроорганизмами.

Промежуточная зона состоит из чередующихся горизонтов разного состава и мощности, среди которых возможны и водоносные. Мощность ее обычно – сотни метров. Как и в зоне локализации, биологические объекты отсутствуют.

Зона обитания включает геологическую среду: материнские породы и почвы, породы зоны аэрации и грунтовых вод, грунтовые и поверхностные воды, часть атмосферы, а также растительный и животный мир.

Разрабатываемое месторождение полезных ископаемых объективно является источником загрязнения окружающей среды. Большую потенциальную угрозу для окружающей среды представляют месторождения металлов, обычно многоэлементные, содержащие набор компонентов, нормируемых в объектах среды обитания человека. Эти компоненты извлекаются не полностью и не все, а хранятся, отравляя окружающую среду химическими агентами (рис. 1).

С начала отработки месторождения сосредоточенные в нем компоненты активизируются и становятся мобильными. Добываемый полезный компонент и сопутствующие ему вещества из зоны активации извлекаются на поверхность, поступают в зону обитания и оказывают на нее воздействие: рудничные воды, горная масса, газы, химические вещества.

С этого времени зона обитания превращается в зону воздействия. В зону воздействия входят воздух,

поверхностные воды и их донные осадки, грунтовые воды, растительный и животный мир, почвенный покров, горные породы зоны аэрации и грунтовых вод, приповерхностная часть атмосферы.

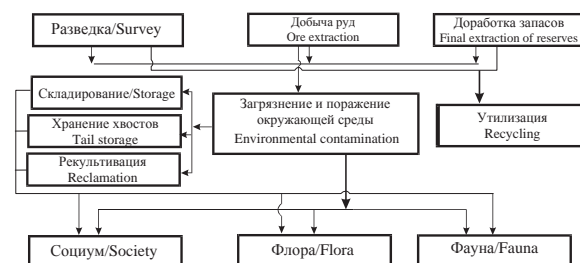


Рис. 1. Влияние горного производства на окружающую среду

Fig. 1. Influence of mining operations on the environment

Промежуточная зона играет роль изоляции. При добыче полезных ископаемых зона изоляции пересекается горными выработками и способствует воздействию процессов добычи на зону обитания.

Извлеченная на поверхность горная масса складировается в отвалах, преобразующих геологический ландшафт с живым веществом (рис. 2).



Рис. 2. Хвостохранилище в зеленом массиве

Fig. 2. Tailing storage facility in woodland

Под воздействием атмосферных и космических факторов отвалы разрушаются, химически преобразуются, подвергаются водному и ветровому разносу. С 1 га отвалов ежегодно сносится от 200 до 500 т горной массы.

Добытая руда транспортируется на перерабатывающее предприятие, где подвергается воздействию атмосферных и космических факторов. На перерабатывающем предприятии руда подвергается воздействию химических реагентов. Хвостохранилища становятся зонами инфильтрации жидкой минеральной фазы в подстилающие породы и грунтовые воды и источниками пыли.

#### Объекты и методы исследования

Горные технологии являются инструментом воздействия, сила которого превышает природные геологические процессы, поэтому снижение уровня их опасности является приоритетным направлением инженерной мысли современности. При

прогнозировании последствий разработки месторождений оценивается не только разрушительное воздействие горного дела на хозяйственные объекты, но и глобальное влияние технологий на геологические процессы.

К числу глобальных явлений относится рост объемов продуктов взрывных процессов горного производства. Перераспределение напряжений в земной коре создает условия для образования водных и газовых потоков. Газовые выбросы влияют на радиационный баланс, образуют туманы, облака, ливневые дожди, провоцируют выпадение катастрофических дождей.

Хрестоматийным примером воздействия древнейших горных технологий на окружающую среду является история Синайского полуострова, где деятельностью древних горняков были изведены леса, что повлекло за собой наблюдаемое в новейшее время опустынивание региона.

Природные явления усиливаются техногенным вмешательством при строительстве и эксплуатации горных объектов. На участках, ослабленных горными работами, дождевые осадки наносят ущерб почвенному покрову, вызывая водную эрозию, снижают плодородие почвы, приводят к ее деградации и смыву. Особенно большой вред ливни наносят там, где осадки не успевают впитываться в почву и стекают по поверхности почвы. Отрицательное воздействие ливней усиливается при растворении атмосферной водой техногенных газовых составляющих воздуха [3].

Катастрофические ситуации оказывают воздействие на Человека, воздушную среду, воду, почву, флору и фауну суши и водоемов в виде химического, радиационного и биологического загрязнений, пожаров, землетрясений и др. катастрофических явлений.

Основными факторами техногенного влияния на геологические ландшафты являются [4]:

- геоморфологические (преобразование поверхности Земли горными работами);
- гидрогеологические (изменение условий питания водоносных горизонтов);
- геохимические (рассеяние химических элементов);
- геотермические (изменение структуры водно-теплового баланса);
- инженерно-геологические (оползни, карсты, просадки, сели и т. п.);
- минералогические (нарушение геодинамического баланса земных недр);
- геофизические (нарушение структуры магнитного и электрического полей Земли, генерация блуждающих токов, сейсмических и звуковых волн).

В новейшее время эволюция технологий недропользования развивается только в направлении изъятия у недр ресурсов без компенсации ущерба. В горнопромышленных регионах наибольшую опасность представляют геохимические и гидрогеологические изменения в местах накопления от-

ходов горнодобывающего и горно-перерабатывающего производства.

Добыча полезных ископаемых ведет к формированию техногенного рельефа, появляются новые отрицательные формы рельефа, активизируются процессы рельефообразования (рис. 3).



**Рис. 3.** Изменение природного ландшафта под влиянием хвостохранилища: 1 – рыхлые отложения стоков; 2 – технологический мусор; 3 – угнетение растительности

**Fig. 3.** Change of natural landscape under the influence of tailing storage facility: 1 – run-off friable deposits; 2 – technological wastes; 3 – flora suppression

Так, крупнейший из железорудных карьеров – Лебединский – достигает глубины 350 м с размахом «крыльев» около 2,5 км. Вокруг карьеров в радиусе 5–10 км образовалось множество балок и оврагов, вместимостью около 4 млрд м<sup>3</sup>. В Старооскольско-Губкинском районе возникли не только выемки глубиной 250–300 м, но и отвалы высотой до 60 м или «горы» из пород вскрыши и отходов обогатительных фабрик. Площадь прямого нарушения земель карьерами достигает 16 тыс. га. Для Белгородской области это около 0,6 % ее площади, а для Губкинского и Старооскольского районов – 5 % территории [5].

Аспекты изменения геологических ландшафтов открытой разработкой типизированы нами по их характеру (таблица).

Влияние технологий и экосистем окружающей среды проявляется двумя способами. Прямое влияние обусловлено тем, что сырье для технологий представляет собой природные ресурсы. В результате тесных взаимосвязей изъятие из недр этих ресурсов влияет на состояние экосистем земли. Косвенное влияние связано с тем, что без разработки ресурсов невозможно экономическое благополучие региона.

Проблема минимизации катастроф включает в себя направления: разработка концепции защиты экосистем окружающей среды; адаптация технологий с учетом экологических требований, моделирование чрезвычайных ситуаций, мониторинг окружающей среды, расчет ущерба от негативного влияния отходов и др.

**Таблица.** Типизация нарушений окружающей среды горными работами

**Table.** Typification of environmental intervention by mining

Типы нарушений Types of disturbance	Причины, вызывающие нарушения природной среды Reasons causing the environmental intervention	Характерные виды нарушений Typical disturbances
Геомеханические Geomechanical	Строительство карьеров, отсыпка отвалов, сооружение насыпей и траншей, деформация поверхности в результате разработки, хранение отходов, воздействие карьерного оборудования Construction of opencasts, stockpile filling, fill and trench construction, surface deformation because of exploration, wastes storage, effect of open-cut equipment	Изменение рельефа местности, геологической структуры массива, грунтов, почвы; механические повреждения и уничтожение почвы; изменение структуры использования поверхности Change of topographic relief, geological structure of the solid, subsoil, soil; mechanical damages and soil destruction; change of structure of surface use
Гидрологические Hydrological	Дренирующее воздействие горных выработок на породный массив; деформация поверхности в связи с дренажом вод; смещение направления водостоков; загрязнение внутренних и внешних вод; откачка подземных вод для различных целей; дренаж месторождений Drainage effect of mining openings on rock mass; surface deformation because of water drainage; drain direction shift; pollution of internal and external waters; pumping-out of ground waters for different purposes; drainage of deposits	Изменение уровня подземных вод и параметров гидрографической сети; ухудшение качества вод; водоносных горизонтов, инженерно-геологических свойств грунтов и водного режима в почве; оседание поверхности; изменение режима подпитки рек Change of ground water level and parameters of drainage network; degradation of quality of underground reservoir waters, engineering-geological features of subsoil and water regime in soil; surface subsidence; change of river makeup mode
Химические Chemical	Эмиссия газов и химически активной пыли; сбросы загрязненных органическими и неорганическими компонентами вод; воздействие токсичных компонентов отвалов Emission of gases and chemically active dust; disposal of waters polluted with organic and non-organic components; effect of toxic components of the dump	Изменение состава и свойств атмосферного воздуха, подкисление, засоление, загрязнение вод, подкисление, алкализация, засоление, увеличение токсичных элементов почв Change of the structure and the features of the air; water acidification, salinization, contamination; acidification, alkalization, salinization, increase of toxic elements in soil
Физико-механические Physical and mechanical	Эмиссия пыли и аэрозолей из атмосферы и вод, загрязненных суспензией и гидрозолями Emission of dust and aerosol from air and water, polluted with suspension and hydrosols	Изменение состава и свойств атмосферного воздуха, вод и почвы Change of the structure and properties of the air, water and soil
Термические Thermal	Загрязнение воздуха пылегазовыми компонентами Air contamination with dust and gas components	Изменение состава и свойств атмосферного воздуха, биохимических процессов в экосистемах и микроклимата Change of the structure and properties of the air, biochemical processes in ecosystems and microclimate

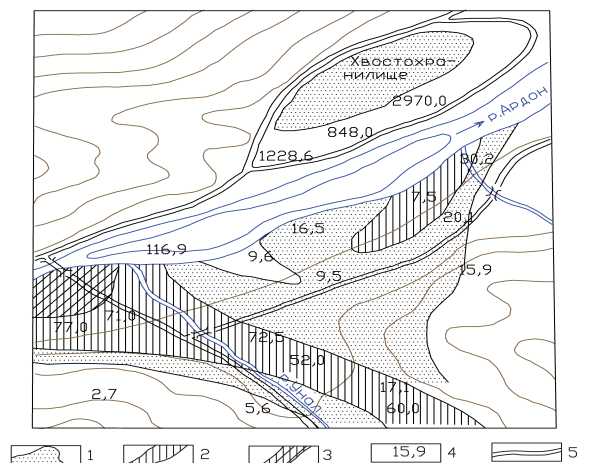
При промышленной эксплуатации месторождений полезных ископаемых на первых этапах существования предприятий выборочно обрабатывают богатые участки, оставляя в недрах некондиционные руды. Так, Коробковское месторождение КМА обрабатывает массив железистых кварцитов, перекрытых мощной толщей обводненных песчано-глинистых пород, этажно-камерной системой разработки в пределах одного выемочного этажа под защитой предохранительной рудной потолочины, опирающейся на междукамерные целики, потери руды в которых составляют 60 %. Поискам инновационных технологий добычи и переработки минерального сырья, способствующих энерго- и ресурсосбережению и обеспечивающих полноту, комплексность извлечения полезных компонентов и экологическую безопасность производства, посвящены работы многих ученых России [6].

В ходе добычи руд запасы обедняются с переводом в категорию неактивных, которые достигают в настоящее время около 50 % запасов большинства месторождений.

Руды перерабатывают на обогатительных фабриках, стоки которых отличаются многообразием состава: пульпа (80–85 %), содержащая до

95–98 % взвесей и коллоидов и сливы сгустителей (3–20 %) [7]. Поведение твердых частиц при отстаивании в сгустителях и хвостохранилищах зависит от размера частиц и состояния их поверхности. Значение процессов отстаивания возрастает при переработке труднообогатимых руд с высоким содержанием шламов. Стоки, представленные флотационными хвостами, сливами сгустителей и фильтратами направляются в хвостохранилища, которые в горных условиях располагаются на берегах водных артерий (рис. 4) [8].

В результате разработки месторождений и первичной переработки руд образуются протяженные ореолы химического загрязнения почв, водотоков и их отложений. Несмотря на снижение объемов горного производства в годы современного промышленного кризиса, минеральное загрязнение не уменьшается, потому что у месторождений установились устойчивые связи с экосистемами окружающей среды и на нейтрализацию нужны годы. Ореолы химического загрязнения формируются за счет растворения твердых частиц поверхностными и подземными водами, сброса шламов обогатительных фабрик и ветрового переноса шлама с пляжей хвостохранилищ.



**Рис. 4.** Расположение Унальского хвостохранилища на берегу реки Ардон. Концентрация металлов (мг/кг): 1) 10–30; 2) 30–100; 3) более 100. 4 – количественный параметр загрязнения; 5 – автодороги

**Fig. 4.** Unal tailing storage facility on the bank of the river Ardon. Metal concentration (mg/kg): 1) 10–30; 2) 30–100; 3) more than 100. 4 is the quantitative parameter of contamination; 5 are the highways

Так, в Старооскольско-Губкинском районе сформировалась зона аномального запыления почв эллипсовидной формы размером до 40 км по длинной оси. В центральной части зоны выпадает более 4000 кг/га пыли в год. Содержание тяжелых металлов (кобальт, никель, хром, ванадий и др.) превышает природный фон нередко в 100 раз. Под влиянием системы гидро-защиты карьеров нарушен режим подземных вод в радиусе до 40 км по верхнему водоносному горизонту и до 80 км по кристаллическому. Вскрышные и рудовмещающие породы, железные руды и продукты их переработки являются источниками аномально высоких ионизирующих излучений, так как железорудные месторождения КМА являются радиационно-опасными [9].

Металлические месторождения поставляют регионам силикозоопасную кварцевую пыль, радионуклиды и комплекс отравляющих веществ, в результате чего подавляющее количество участков добычи руд правомерно относить к районам геологического бедствия.

Антропогенное воздействие на окружающую среду в горнодобывающих регионах достигло уровня, превышающего восстановительные силы природы. Взаимовлияние уровней загрязнения в атмосфере, гидросфере и литосфере, вследствие увеличения количества и качества загрязнителей позволяет прогнозировать возможность техногенных катастроф.

Сложный многокомпонентный состав хвостов обогащения и металлургии, содержащих вещества первого и второго класса опасности, не позволяет утилизировать их без обезвреживания, а применяемые технологии переработки не позволяют извлекать ценные компоненты при малом их содержании до уровня санитарных требований.

Количество накопленных хвостов измеряется миллионами тонн. В хранилища сбрасываются ценные компоненты: золото, уран и редкоземельные элементы. В хвостохранилища только Михайловского ГОК КМА ежегодно выносятся не менее 1,5 т золота и 2 т урана. Прогнозные ресурсы только золота в текущих отходах четырех ГОК составляют не менее 3 т/год при валовом содержании 0,5–0,6 г/т, а в укрупненных пробах, отобранных из пульпопроводов, содержание золота изменяется в пределах 0,2–9 г/т. Такая ситуация характерна для всех металлических рудников [10].

Работы по глубокой утилизации отходов производства в России и большинстве стран мира пока не выходят за рамки обсуждения проектов. Утилизация металлосодержащих хвостов возможна только при условии извлечения из них металлов до уровня санитарных норм.

В горнодобывающих областях имеются запасы техногенного сырья, инфраструктура и кадры для организации перерабатывающего производства. Но практических мер по утилизации хвостов переработки не предпринимается. В результате расширения запасов хвостохранилищ для нужд населения и использования в теневом бизнесе территория региона систематически усугубляет статус региона с катастрофической загрязненностью химическими продуктами.

Использование металлосодержащих хвостов без извлечения из них металлов иногда преподносится как пример «безотходной технологии производства концентрата с подземным складированием необесшламленных хвостов». Экономический ущерб, наносимый утилизацией хвостов без извлечения металлов, очевиден, поскольку суммарная стоимость похороненных ценных полезных элементов может превышать стоимость извлеченных металлов.

В отечественном производстве не работает механизм исполнения Закона Российской Федерации «О недрах», статья 22 которого предусматривает [11]:

- соблюдение требований законодательства, а также утвержденных в установленном порядке стандартов по технологии ведения работ, связанных с использованием недрами, и при первичной переработке минерального сырья;
- соблюдение утвержденных в установленном порядке стандартов, регламентирующих условия охраны недр, атмосферного воздуха, земель, лесов, вод, а также зданий и сооружений от вредного влияния работ, связанных с использованием недрами;
- приведение участков земли и других природных объектов, нарушенных при пользовании недрами, в состояние, пригодное для их дальнейшего использования.

Считается, что ущерб здоровью населения регионов добычи возмещается штрафами, размеры которых несопоставимы по величине с нанесенным вредом при пользовании недрами и к рекреации природы нередко не имеют отношения.

Опыт стран с развитой добывающей отраслью свидетельствует, что законы о недрах нарушаются не везде. Например, в Германии утилизация осуществляется за счет средств, отчисляемых предпринимателем с начала добычи ресурсов в установленном законом порядке. Поэтому утилизация хвостов осуществляется непременно и в срок.

Новая концепция обращения с некондиционным минеральным сырьем исходит из того, что, поскольку оценить действительный ущерб от горного производства невозможно, следует исключить возможность нанесения ущерба: хвосты не хранить, а утилизировать [12].

Из известных способов извлечения металлов выщелачивание металлов считается более перспективным, хотя оно длится долго и не обеспечивает извлечения до фонового уровня [13].

Возможность извлечения металлов до уровня санитарных требований представляет технология с механохимической активацией процессов выщелачивания, которая:

- увеличивает извлечение металлов в 1,5–2 раза;
- по сравнению с вариантом раздельной активации и выщелачивания обеспечивает равное извлечение во время на два порядка меньше [14].

В ближайшей перспективе основные запасы металлических руд России предстоит добывать подземным способом разработки в большей степени потому, что открытый способ разработки вступил в антагонистические противоречия с вопросами охраны окружающей среды.

Поэтому проблема утилизации хвостов переработки приобретает особую актуальность как радикальное средство предупреждения техногенного перерождения природных геологических ландшафтов.

В хвостохранилищах неуправляемо развиваются физико-химические процессы природного выщелачивания с химическим загрязнением окружающей среды. В камере же дезинтегратора реагенты в замкнутом контуре переводят в раствор большую часть содержащихся в хвостах металлов в течение приемлемого времени.

Механохимическая технология позволяет извлекать из хвостов обогащения металлы до уровня санитарных требований. Экспериментальное обоснование этого осуществлено на хвостах обогащения цветных и черных металлов и углей.

Хвосты выщелачивали в дезинтеграторе в альтернативных режимах (рис. 5):

1. Агитационное выщелачивание необработанных хвостов.
2. Агитационное выщелачивание предварительно активированных хвостов.
3. Выщелачивание хвостов в дезинтеграторе.
4. Агитационное выщелачивание активированных в дезинтеграторе хвостов.
5. Многократное выщелачивание хвостов в дезинтеграторе.

При постановке экспериментов с использованием математического планирования по плану Вен-

кена-Бокса в качестве независимых факторов приняты:

- содержание серной кислоты в выщелачивающем растворе ( $X_1$ ) 2–10 г/л;
- содержание хлорида натрия в выщелачивающем растворе ( $X_2$ ) 20–160 г/л;
- весовое соотношение массы выщелачивающего раствора и выщелачиваемой массы ( $X_3$ ) в единичном эксперименте (50 г) 4–10 г/л;
- время выщелачивания ( $X_4$ ) в пределах 0,15–1,0 ч.



Рис. 5. Лабораторный дезинтегратор Дез-11

Fig. 5. Laboratory disintegrator Dez-11

*Полиметаллические руды* Садонских месторождений (Россия, Северный Кавказ). Химический состав хвостов, %:  $\text{SiO}_2$  – 31,4; Fe – 4,4; CaO – 1,96; S – 1,88; Ag – 0,015; Cu – 0,18; Mn – 0,015;  $\text{K}_2\text{O}$  – 3,5;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,8;  $\text{TiO}_2$  – 0,03; Zn – 0,95; Pb – 0,84. Извлечение металлов в раствор при единичном цикле переработки составило: свинец – от 13 до 34 %, цинк – от 10 до 46 %.

Результаты исследования позволяют сделать выводы:

- активация в дезинтеграторе с выщелачиванием вне его увеличивает извлечение: по свинцу – в 1,4 раза, по цинку – в 1,1 раза;
- выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом раздельной активации и выщелачивания обеспечивает такое же извлечение на 2 порядка скорее;
- в порядке убывания степени влияния на процесс следуют: содержание в выщелачивающем растворе реагента, частота вращения роторов дезинтегратора, число циклов переработки и соотношение Ж: Т.

*Железистые кварциты КМА.* Химический состав хвостов магнитной сепарации железистых кварцитов, %:  $\text{SiO}_2$  – 64, Fe – 8,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 5,2, Mn – 3,2,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0,7, P – 0,1, Ca – 0,8, MgO – 0,2, Cu –  $5 \cdot 10^{-3}$ , Ni –  $4 \cdot 10^{-3}$ , Zn –  $5 \cdot 10^{-4}$ , As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y –  $(30-50) \cdot 10^{-5}$ .

При содержании железа в исследуемой пробе 8 % однократным выщелачиванием извлечено примерно 1 % железа, а после трехкратного пропускания хвостов через дезинтегратор в раствор

извлечено 3 % железа. При дальнейшем увеличении циклов переработки достигается безопасное по санитарным требованиям содержание железа во вторичных хвостах.

Кроме эффекта извлечения активация хвостов в дезинтеграторе увеличивает прочность твердеющей смеси с добавкой цемента на величину коэффициента 1,17.

*Угли Росийского Донбасса.*

Извлечение из растворов выщелачивания хвостов обогащения в выпаренный и прокаленный продукт составило, %: кобальта – 104,5; никеля – 102,1; свинца – 43,5; цинка – 36,6; хрома – 18,0; марганца – 1,4. Извлечение металлов при их очень малом содержании в растворах, мг/л: марганец – 1, никель – 7, кобальт – 2, хром – 4, свинец – 3, цинк – 5.

Эффективность технологии безотходной утилизации определяется соотношением затрат и ущерба от хранения отходов, а область эффективного применения природоохранных технологий – как совокупность значений, отвечающих приемлемому качеству окружающей среды при доступных затратах на ее поддержание (рис. 6).

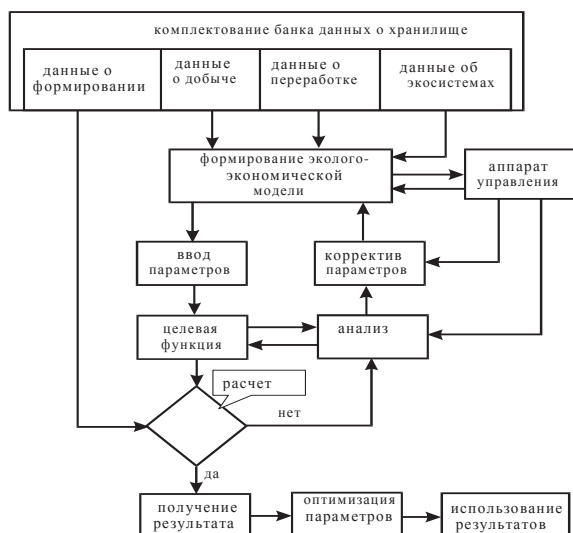


Рис. 6. Схема исследования эффективности утилизации

Fig. 6. Diagram of studying recycling efficiency

Универсальная схема безотходного горнодобывающего производства включает этапы процесса от добычи до использования в виде товара (рис. 7).

Получение экономического эффекта от утилизации хвостов обогащения возможно в случае оптимизации параметров системы «добыча–переработка» [15].

Метод оценки включает в себя этапы:

- анализ сырьевой базы для использования технологии безотходной утилизации;
- оценка возможностей рынка новой попутной продукции;
- анализ качества основной и новой попутной продукции;
- анализ материальных и денежных потоков в процессе производства;

- анализ цен минерального сырья и продуктов его переработки.

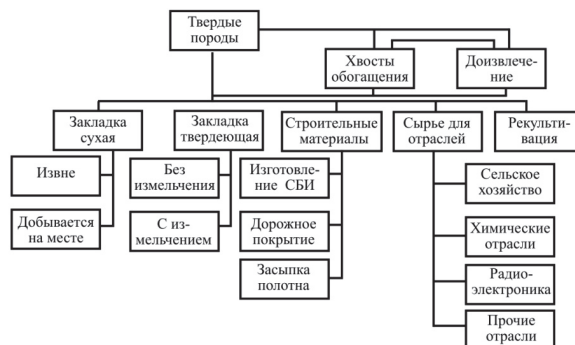


Рис. 7. Схема утилизации хвостов обогащения

Fig. 7. Diagram of mill tailing recycling

Концепт экономической эффективности новой технологии состоит в том, что при сравнимых затратах из уже извлеченного из недр сырья извлекается большее количество металла за счет утилизации некондиционного по содержанию металлов сырья.

Механизм оценки утилизации хвостов обогащения включает в себя:

- прогнозирование роста эффективности производства;
- перевод забалансовых запасов в категорию балансовых;
- координацию деятельности по регулированию технологических процессов;
- оценку, контроль и анализ результатов переработки.

Финансовые результаты – прибыль по итогам деятельности участка переработки  $\Pi_p$ :

$$\Pi_p = \Pi_{mi} - C_{ТП} = \Pi_{mi} - C_o - C_{тр} - C_m,$$

где  $\Pi_{mi}$  – ценность извлеченного металла, р.;  $C_{ТП}$  – себестоимость товарной продукции, р.;  $C_o$  – себестоимость обогащения, р.;  $C_{тр}$  и  $C_m$  – затраты на транспортирование до завода и на металлургический передел, р.

Эколого-экономическая модель эффективности утилизации некондиционного минерального сырья по критерию максимум прибыли с учетом экологии региона расположения горного предприятия объединяет экологический и экономический компоненты обращения с некондиционным минеральным сырьем [16]:

$$\begin{aligned} \Pi = & \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N \{ (M_{ey} \Pi_{my} + Q_y \Pi_{qy}) \} - \\ & - \sum_{z=1}^3 [K(1 + E_{ny}) + E_q + E_x] - \\ & - [(M_e \Pi_m + Q \Pi_q) + \\ & + Q_r \Pi_r] K_c K_y K_T K_6 K_T K_{вp} K_q \rightarrow \max, \end{aligned}$$

где P – продукты утилизации некондиционного сырья; O – виды некондиционного сырья; П – технологические процессы переработки сырья; T – время переработки некондиционного сырья; F –

фазы существования рудника и фабрики;  $N$  – стадия утилизации некондиционного сырья;  $Z$  – затраты на переработку некондиционного сырья;  $K$  – капитальные вложения для организации участка утилизации некондиционного сырья;  $K_c$  – коэффициент самоорганизации отвалов некондиционного сырья,  $K_y$  – коэффициент утечки растворов;  $K_r$  – коэффициент дальности утечки растворов;  $K_b$  – коэффициент влияния ингредиентов на биосферу;  $K_r$  – коэффициент риска;  $K_{bp}$  – коэффициент учета времени;  $K_q$  – коэффициент неучтенных факторов.

Прибыль от извлечения металлов из некондиционного минерального сырья [17]:

$$\Pi_x = \frac{\sum_{n_o} (C_{т.о} - Z_{о.о} - Z_{о.м}) \cdot Q_o}{t_o} + C_{ш}^o + \frac{\sum_{n_m} (C_{т.м} - Z_{о.м} - Z_{м.м}) \cdot Q_m}{t_m} + C_{ш}^m,$$

где  $\Pi_x$  – прибыль от переработки некондиционного сырья, р./т;  $C_{т.о}$  – стоимость реализации продукции переработки некондиционного сырья, р./т;  $Z_{о.о}$  – затраты на обогатительный передел некондиционного сырья, р./т;  $Z_{о.м}$  – затраты на металлургический передел некондиционного сырья, р./т;  $n_o$  – количество извлекаемых компонентов из некондиционного сырья;  $Q_o$  – масса некондиционного сырья, т;  $t_o$  – время переработки сырья, год;  $C_{ш}^o$  – штрафы за хранение хвостов обогащения, р./год;  $C_{т.м}$  – реализация продуктов переработки хвостов металлургии, р./т;  $Z_{о.м}$  – затраты на обогащение хвостов металлургии, р./т;  $Z_{м.м}$  – затраты на металлургический передел хвостов металлургии, р./т;  $n_m$  – количество извлекаемых из хвостов металлургии компонентов;  $Q_m$  – масса хвостов металлургии, т;  $t_m$  – время переработки хвостов металлургии, лет;  $C_{ш}^m$  – штрафы за хранение хвостов металлургии, р./год.

В условиях некоторых горнодобывающих предприятий безотходная утилизация хвостов обогащения может быть прибыльной даже без производства продукции из утилизируемых хвостов, если при этом уменьшается опасность для окружающей природной среды [18].

Механохимическая активация хвостов в аппаратах, где выщелачивающий раствор запрессовывается в образующиеся трещины, а извлечение металлов происходит одновременно с разрушением кристаллов, обеспечивает извлечение металлов в интервале от 50 до 80 % от исходного содержания в хвостах со снижением остаточного содержания до норм ПДК.

Важной особенностью механохимической технологии является то, что после извлечения металлов хвосты обогащения могут быть использованы в составе твердеющей смеси не только в качестве инертных заполнителей, но и в качестве вяжущих компонентов, так как увеличение активности компонентов на 20–25 % повышает прочность смеси до 1 Мпа [19].

Инструментом получения прибыли при полной утилизации хвостов обогащения может быть механохимическая переработка по предлагаемой схеме (рис. 8).



Рис. 8. Схема извлечения металлов из хвостов обогащения

Fig. 8. Diagram of metal extraction from mill tailings

В процессе механоактивации извлекаются все содержащиеся в хвостах металлы до уровня санитарных требований, после чего вторичные хвосты становятся пригодными для изготовления товарной продукции без ограничений [20].

#### Заключение

Накопление хвостов переработки металлических руд формирует глобальную проблему перерождения природных геологических ландшафтов, реальное решение которой заключается только в безотходной утилизации хвостов переработки.

Утилизация хвостов обогащения металлических руд приносит прибыль, величина которой определяется разностью величин предотвращаемого ущерба и затрат на утилизацию. При объективной оценке опасности хранения хвостов обогащения утилизация хвостов может обеспечить народнохозяйственный эффект даже без производства товарной продукции из утилизируемых хвостов.

Вовлечение в производство техногенных запасов хвостов обогащения металлических руд является важным фактором удовлетворения потребностей общества в металлах. Переход многих предприятий на подземную разработку месторождений должен компенсировать уменьшение объемов добычи улучшением качества добываемого сырья за счет использования технологий с закладкой пустот твердеющими смесями, которые могут изготавливаться из хвостов переработки руд.

Извлечение металлов из хвостов обогащения руд обеспечивается использованием технологий с механохимической активацией, что подтверждается сходимостью результатов переработки сырья различных типов.

Вовлечение в производство колоссальных минеральных ресурсов создает новую сырьевую базу для горной промышленности и заменяет необходимость освоения новых месторождений минерального сырья, что приобретает особую актуальность ввиду дефицита в России ряда металлов для обеспечения ее национальной безопасности.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов А.Г., Петин А.Н., Дроздова Е.А. Геоморфологические и эколого-экономические аспекты рекультивации отвалов вскрышных пород горнодобывающих предприятий региона КМА // Горный журнал. – 2014. – № 9. – С. 67–72.
2. Беланов И.П., Семина И.С., Шпилова А.М. Почвенно-экологическое состояние естественных ландшафтов в районе интенсивной добычи каменного угля // ГИАБ. – 2013. – № 10. – С. 112–116.
3. Легостаева Я.Б., Ксенофонтова М.И., Дягилева А.Г. Эколого-геохимический мониторинг почвенного покрова в зоне воздействия Нюрбинского ГОКа // Горный журнал. – 2014. – № 4. – С. 79–83.
4. Трубецкой К.Н., Корнилов С.В., Яковлев В.Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 57–62.
5. Колмыков С.Н., Корнилов И.А. Экологическое состояние водных объектов Старооскольско-Губкинского района как элементов экологического и рекреационного каркаса // Современные проблемы освоения недр: матер. II Междунар. заочной науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Белгород: ИПК НИУ «БелГУ», 2012. – С. 129–132.
6. Амвросов А.Ф. Мониторинг опасных геологических процессов при недропользовании // ГИАБ. – 2014. – № 7. – С. 45–50.
7. Ермолович Е.А. Утилизация отходов обогащения железистых кварцитов в мелкозернистой бетонной смеси для тротуарной плитки // ГИАБ. – 2013. – № 8. – С. 84–87.
8. Фоменко А.А. Использование техногенных скоплений и забалансовых руд цветных металлов в контексте экономики природопользования // Горный журнал. – 2013. – № 2. – С. 89–94.
9. Голик В.И., Полухин О.Н. Природоохранные технологии в горном деле. – Белгород: НИУ БелГУ, 2013. – 281 с.
10. Корнилов И.А., Колмыков С.Н., Петин А.Н. Оценка степени воздействия горнодобывающих предприятий КМА на гидро-экологическую ситуацию Белгородской области // Горный журнал. – 2012. – № 10. – С. 68–72.
11. Гендлер С.Г. Обеспечение комплексной безопасности при освоении минерально-сырьевых и пространственных ресурсов недр // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 98–102.
12. Логачев А.В. К вопросу о геотехнологических вариантах поэтапной разработки месторождений // Цветная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 46–50.
13. Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production / O.N. Polukhin, V.I. Komashchenko, V.I. Golik, C. Drebenstedt. – Freiberg, Germany, 2014. – P. 402–413.
14. Golik V.I., Rasorenov Y.I., Efrementkov A.B. Recycling of ore mill tailings // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 682. – P. 363–368. DOI: 10.4028.
15. Ракишев Б.Р. Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 68–73.
16. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля / В.И. Голик, В.И. Комащенко, С.Г. Страданченко, С.А. Масленников // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 91–95.
17. Голик В.И. Концептуальные подходы к созданию мало- и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий // Горный журнал. – 2013. – № 5. – С. 79–85.
18. Голик В.И., Полухин О.Н. Концепция извлечения металлов из хвостов переработки железных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – Специальный выпуск. – № ОС4. – № 3. – С. 67–72.
19. Golik V.I., Komashshenko V.I., Drebenstedt K. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – P. 137–142.
20. Golik V.I., Komashshenko V.I., Rasorenov Y.I. Activation of Technogenic Resources Disintegrators. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – P. 143–148.

Поступила 12.11.2014 г.

UDC 504.55.054:622(470.6)

## PROTECTION OF NATURAL GEOLOGICAL ENVIRONMENT BY UTILIZING ORE TAILINGS

**Vladimir I. Golik,**

North Caucasian State Technological University, 44, Nikolaeva street, Vladikavkaz, 362021, Russia. E-mail: vigolik@mail.ru

**Yuri I. Razorenov,**

North Caucasian State Technological University, 44, Nikolaeva street, Vladikavkaz, 362021, Russia. E-mail: yiri1963@mail.ru

**Stanislav A. Maslennikov,**

Institute of the service sector and entrepreneurship, 1, Lenin Avenue, Shakhty, 346500, Russia. E-mail: MaslennikovSA@mail.ru

*The main aim of the research is to study the feasibility and economic viability of waste-free extraction of metals and salts from ore tailings to the standards of sanitary safety by new methods, such as mechanical activation.*

*Methods: laboratory studies in Disintegrator installing DES 11 by the integrated program and the method including a study of tailings, metal leaching with the reagents in percolators, metals combined leaching with reagents in a disintegrator; interpretation of the test results in the form of a logarithmic or polynomial interpolation and mathematical description; simulation of the parameters of mechanical activation; statistical analysis based on multiple regression and correlation analysis implementing the algorithms in the software environment MATLAB.*

**Results:** The authors have identified new laws of extracting metals from ore tailings of ferrous and nonferrous metallurgy and coal washing, depending on the processing variables. It is proved that the method of mechanical activation allows metal separation from the tailings to the standards of sanitary requirements that will prevent a catastrophic degradation of natural geological landscapes. The authors developed the environmental-economic-mathematical model to assess the recommended technologies for extracting metals from ore tailings with the calculation of ecological and economic effect of the options of involving substandard mineral raw materials in production.

**Conclusions.** The degradation level of natural geological landscapes is reduced by radical recycling of ore mining and processing tailings stored on the earth surface. Separation of metals from ore tailings to the standards of sanitary requirements is provided by the processing by the mechanical activation method. The waste-free recycling of ore mining and processing tailings provides economic benefits due to engaging the substandard mineral raw materials in the production to obtain the marketable products.

**Key words:**

Geological landscape, development, field, enrichment, tails, metals, recycling, economy, environment, income, technology, mechanochemistry.

**REFERENCES**

- Kornilov A.G., Petin A.N., Drozdova E.A. geomorfologicheskie i ekologo-ekonomicheskie aspekty rekultivatsii otvalov vskryshnykh porod gornodobyvayushchikh predpriyaty regiona KMA [Geomorphological and ecological-economic aspects of remediation of overburden dumps in KMA mining region]. *Mining Journal*, 2014, no. 9, pp. 67–72.
- Belanov I.P., Semina I.S., Shipilova A.M. Pochvenno-ekologicheskoe sostoyanie estestvennykh landshaftov v rayone intensivnoy dobychi kamennogo uglya [Soil and environmental condition of the natural landscape in the area of intensive coal mining]. *GIAB*, 2013, no. 10, pp. 112–116.
- Legostaeva Ya.B., Ksenofontova M.I., Dyagileva A.G. ekologo-geokhimichesky monitoring pochvennogo pokrova v zone vozdeystviya Nyurbinskogo GOKa [Ecological and geochemical monitoring of soil in the affected area Nurba GOK]. *Mining Journal*, 2014, no. 4, pp. 79–83.
- Trubetzkoy K.N., Kornilkov S.V., Yakovlev V.L. O novykh podkhodakh k obespecheniyu ustoychivogo razvitiya gornogo proizvodstva [On new approaches to sustainable development of mining production]. *Mining Journal*, 2012, no. 1, pp. 57–62.
- Kolmykov S.N., Kornilov I.A. Ekologicheskoe sostoyanie vodnykh obektov Starooskolsko-Gubinskogo rayona kak elementov ekologicheskogo i rekreatsionnogo karkasa [Ecological status of water bodies in Starooskolsk-Gubinsk district as the elements of ecological and recreational carcass]. *Sovremennye problemy osvoeniya nedr. Materialy II Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov* [Modern problems of development of mineral resources. Proc. II Intern. extramural scientific-practical conf. for young scientists and students]. Belgorod, IPK NIU «BelSU», 2012. pp. 129–132.
- Amvrosov A.F. Monitoring opasnykh geologicheskikh protsessov pri nedropolzovanii [Monitoring of hazardous geological processes in subsoil use]. *GIAB*, 2014, no. 7, pp. 45–50.
- Ermolovich E.A. Utilizatsiya otkhodov obogashcheniya zhelezistykh kvartsitov v melkozernistoy betonnoy smesi dlya trotuarnoy plitki [Disposal of tailings of ferruginous quartzites in fine concrete mixes for paving slabs]. *GIAB*, 2013, no. 8, pp. 84–87.
- Fomenko A. Ispolzovanie tekhnogennykh skoplenny i zabalansovykh rud tsvetnykh metallov v kontekste ekonomiki prirodopolzovaniya [Using technological clusters and balance ores of nonferrous metals in the context of environmental economics]. *Mining Journal*, 2013, no. 2, pp. 89–94.
- Golik V.I., Polukhin O.N. *Prirodookhrannyye tekhnologii v gornom dele* [Environmental protection technologies in mining industry]. Belgorod, NIU Bel GIs, 2013. 281 p.
- Kornilov I.A., Kolmykov S.N., Petin A.N. Otsenka stepeni vozdeystviya gornodobyvayushchikh predpriyaty KMA na gidroekologicheskuyu situatsiyu Belgorodskoy oblasti [Evaluation of KMA mining enterprises impact on hydroecological situation in Belgorod region]. *Mining Journal*, 2012, no. 10, pp. 68–72.
- Gendler S.G. Obespechenie kompleksnoy bezopasnosti pri osvoenii mineralno-syryevykh i prostranstvennykh resursov nedr [Integrated security when developing mineral resources and spatial subsoil resources]. *Mining Journal*, 2014, no. 5, pp. 98–102.
- Logachev A.V. K voprosu o geotekhnologicheskikh variantakh poetapnoy razrabotki mestorozhdeny [On the issue of geotechnical options of phased field development]. *Non-ferrous metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 46–50.
- Polukhin O.N., Komashchenko V.I., Golik V.I., Drebenstedt C. *Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production*. Freiberg, Germany, 2014. pp. 402–413.
- Golik V.I., Rasorenov Y.I., Efremenkov A.B. Recycling of ore mill tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 363–368. DOI: 10.4028.
- Rakishev B.R. Kompleksnoe ispolzovanie rudy na predpriyatiyakh tsvetnoy metallurgii Kazakhstana [Integrated use of ores at nonferrous metallurgy enterprises of Kazakhstan]. *Mining Journal*, 2013, no. 7, pp. 68–73.
- Golik V.I., Komashchenko V.I. Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Povyshenie polnoty ispolzovaniya nedr putem glubokoy utilitatsii otkhodov obogashcheniya uglya [Increase of completeness in using subsoil by deep disposal of coal enrichment]. *Mining Journal*, 2012, no. 9, pp. 91–95.
- Golik V.I. Kontseptualnye podkhody k sozdaniyu malo- i bezotkhodnogo gornorudnogo proizvodstva na osnove kombinirovaniya fiziko-tekhnicheskikh i fiziko-khimicheskikh geotekhnologiy [Conceptual approaches to development of low- and non-waste mining production on the basis of a combination of physical, technical, and physical-chemical geotechnologies]. *Mining Journal*, 2013, no. 5, pp. 79–85.
- Golik V.I., Polukhin O.N. Kontseptsiya izvlecheniya metallov iz khvostov pererabotki zheleznykh rud [The concept of metal extraction from tailings of iron ores]. *Mining information-analytical bulletin*, 2013, Special Edition, no. OC4, no. 3, pp. 67–72.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Drebenstedt K. *Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators*. Switzerland, Springer International Publishing, 2014. pp. 137–142.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Rasorenov Y.I. *Activation of Technogenic Resources Disintegrators*. Switzerland, Springer International Publishing, 2014. pp. 143–148.

Received: 12 November 2014.