

Научная статья

УДК 622.273.218

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-125-137

ВЫБОР СОСТАВА ГЕОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ШАХТНОМ ПОДЗЕМНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ

Федотенко Виктор Сергеевич, Радченко Дмитрий Николаевич,
Гаджиева Луиза Абду-Самадовна*

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН

*для корреспонденции: gadzhieva_l@ipkonran.ru



Информация о статье

Поступила:

27 мая 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

25 июля 2024 г.

Принята к публикации:

29 августа 2024 г.

Опубликована:

26 сентября 2024 г.

Ключевые слова:

шахтное подземное
выщелачивание; камера-
реактор; изоляция;
устойчивость
горнотехнических
конструкций;
кислотостойкость;
геополимер; дацит;
комплексное освоение недр

Аннотация.

На основе рассмотрения и анализа современных методов шахтного (блочного) подземного выщелачивания установлено, что наиболее существенными недостатками, ограничивающими область применения этой технологии, являются высокий риск миграции агрессивных растворов за пределы блоков выщелачивания, высокие потери руд в целиках и практическая невозможность взрывной подготовки рудной массы до крупности, необходимой для достижения высокого уровня извлечения металлов. Для решения указанных проблем предложена технология шахтного подземного выщелачивания в специально создаваемых в недрах камерах, предназначенных для загрузки рудами цветных металлов и их последующего выщелачивания в подземных условиях. Эффективность применения предложенной технологии во многом определяется возможностью изоляции рабочего пространства путем создания в стенках и основании камеры специальных горнотехнических конструкций с требуемыми характеристиками. В статье приведены результаты исследования вмещающих пород месторождений медно-колчеданных руд в свете возможности формирования на их основе геополимерных материалов, характеризующихся требуемыми прочностными, гидро-, термо-, кислотостойкими свойствами. В результате выполненных лабораторных исследований установлено, что геополимерные массивы на основе вмещающих пород характеризуются высокими прочностными характеристиками – до 22 МПа, устойчивостью к длительному воздействию серной кислоты концентрацией до 10%, низким значением водопоглощения и устойчивостью к воздействию высоких температур, достигающих 600°C.

Для цитирования: Федотенко В. С., Радченко Д. Н., Гаджиева Л. А.-С. Выбор состава геополимерного материала для изоляции горнотехнических конструкций при шахтном подземном выщелачивании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 4 (164). С. 125-137. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-125-137, EDN: MBTYZY

Введение. Возрастающая потребность общества в цветных металлах в условиях снижения качества руд и, как следствие, увеличение объемов их производства [1] влечет за собой ряд социальных и экологических проблем, связанных с образованием огромного количества отходов в результате горнодобывающей деятельности [2]. В таких

условиях необходим поиск новых и совершенствование существующих решений, позволяющих минимизировать объемы выдаваемых и в последующем складированных на поверхности отходов добычи руд. Так, подземное выщелачивание предусматривает выдачу на поверхность только продуктивных растворов, исключая образование твердых

отходов. Наиболее широкое применение выщелачивание получило при добыче металлов, представленных легкорастворимыми минеральными формами, вскрытие которых не требует проведения больших объемов работ по интенсификации процесса выщелачивания. Вместе с тем возрастающий спрос на стратегическое сырье при усложняющихся горно-геологических и горнотехнических условиях освоения месторождений способствовали появлению и развитию технологии скважинного и блочного подземного выщелачивания урана, меди, никеля, золота и др. [3-6].

Анализ опыта применения технологии подземного блочного выщелачивания свидетельствует, что традиционно блоки выщелачивания представляли собой предварительно взорванную и замагазинированную рудную массу с оформленными различными способами оросительными и раствороулавливающим горизонтами [7,8]. При различных конструктивных вариантах формирования блоков подземного выщелачивания оросительные горизонты выполнялись с полной подсечкой и монтажом системы орошения, оставлением породного или созданием искусственного целиков с последующим бурением в них орошающих скважин до верхнего уровня отбитой руды.

Для обеспечения эффективности процесса в практике подземного блочного выщелачивания руд наиболее распространены следующие способы сбора и улавливания растворов:

- в дренажные выработки с помощью дренажных скважин, пробуренных в днище блока из кровли дренажной выработки;
- с дренажной выработкой со слоем мелкодробленой породы на гидроизоляционном слое;
- с дренажными скважинами, пробуренными в почву выработки нижней подсечки под зеркало подземных вод [9].

Высокие потери полезного компонента, связанные с утечкой продуктивных растворов, способствовали постоянному развитию методов изоляции блоков подземного выщелачивания. Предложены методы создания локальных завес под раствороприемным днищем путем нагнетания в скважины, пробуренные в массиве трещиноватых зон, твердеющих смесей на основе цемента или растворов синтетических смол [10], применения железобетонных перемычек [11] и создания изолирующих слоев на основе сульфато- и кислотостойких бетонов [12-14]. Известны технологические решения, основанные на создании барьера за счет подачи импульсов высокого давления сжатого воздуха и применении электровакуумных установок [15,16]. Анализ известных способов

предотвращения растекания растворов при блочном выщелачивании показал необходимость создания более материалоемких и экономически эффективных методов гидроизоляции, причем условия протекания процессов выщелачивания в подземных условиях определяют дополнительные требования к свойствам изоляционных конструкций — это газо- и термостойкость, а также устойчивость к агрессивным средам. Значительные исследовательские усилия как в России, так и за рубежом были направлены на совершенствование конструкции блоков с целью повышения экологической и экономической эффективности технологии, а также различных технологических процессов, таких как взрывная подготовка рудной массы, воздействие на предварительно замагазинированную руду различными внешними воздействиями. Для интенсификации процессов предложены способы подачи выщелачивающих растворов в смеси с воздухом в режиме гидродинамической кавитации в замагазинированную руду через пробуренные в предохранительном целике восходящие скважины [17], ультразвуковой обработки [18].

Несмотря на известные преимущества систем шахтного подземного выщелачивания металлов, до настоящего времени можно выделить несколько нерешенных задач применяемых и перспективных технологических решений (Таблица 1). Главным недостатком шахтного подземного выщелачивания является высокая экологическая опасность технологических процессов ввиду риска неконтролируемой и, тем более, массовой утечки растворов за пределы блоков подземного выщелачивания. Высокий риск обрушения днищ блоков камер выщелачивания ввиду их разупрочнения агрессивными растворами [19]. Кроме этого, блочное выщелачивание влечет значительные потери ценных компонентов, так как блоки выщелачиваемой руды окружены конструкциями, содержащими ценные компоненты. Объем вмещающих пород и руд, являющихся естественным ограничителем блоков взорванной горной массы, может достигать объема выщелачиваемых руд.

Значительной частью указанных в Таблице 1 недостатков лишена технология шахтного подземного выщелачивания в специально создаваемых в недрах камерах, предназначенных для загрузки рудами цветных металлов и их последующего выщелачивания в подземных условиях. В соответствии с концепцией (Рис. 1, а), предлагаемая геотехнология базируется на создании в подземном руднике камер для загрузки рудами требуемой крупности, а также условий, приближенных к известным процессам инновационного кучного выщелачивания — подаче выщелачивающих растворов с

необходимыми плотностью орошения, химическим составом, температурой и микробными сообществами, а также их циркуляции в требуемых режимах до получения кондиционных продуктивных растворов, подаче окисляющих газов [20]. Для условий разработки мощных рудных месторождений камерными системами с твердеющей закладкой выработанного пространства технология базируется на возведении в основании камеры второй очереди либо в выработанном пространстве камер после отработки локальных рудных тел прочного кислотостойкого днища, на которое после набора требуемой прочности отсыпается руда для последующего выщелачивания цветных металлов. Днище обустраивается системой скважин для сбора растворов и подачи окисляющих газов. Из заездов вентиляционно-закладочного горизонта или из специально пробуренных скважин создается система орошения (рис. 1, б). Существенным недостатком указанной технологии, снижающим ее экономическую эффективность, является необходимость применения для формирования изолирующих конструкций дорогостоящих кислотостойких цементов, причем включение в состав смесей для формирования изолирующих конструкций пустых пород позволяет в значительной степени повысить привлекательность технологии за счет снижения объемов рудной массы, выдаваемой на поверхность.

Выполненный анализ материалов, отвечающих требованиям технологии выщелачивания при доступности исходных материалов и возможности включения в состав отходов производств, позволил выделить минеральные вяжущие, получаемые в ходе щелочной активации алюмосиликатного сырья природного и техногенного происхождения. Шлакощелочные вяжущие состоят из двух компонентов: щелочного активатора твердения и цементирующего минерального порошка, который может быть представлен доменным гранулированным шлаком, пуццоланом, смесью известь-пуццолан/шлак, алюминатами кальция и портландцементом с минеральной добавкой, а конструкции на основе этих вяжущих, согласно ряду исследований [21-23], характеризуются высокой прочностью и долговечностью. Однако необходимость активации алюмосиликатного сырья едкими щелочами, низкомолекулярными растворимыми силикатами и другими опасными компонентами ограничивает возможность применения его в подземных условиях. Кроме того, наличие в структуре материала свободных K^+ или Na^+ при длительном воздействии агрессивных растворов может привести к их вымыванию и разрушению ответственных конструкций камер выщелачивания [24].

Другим типом перспективных материалов являются геополимеры, где в продолжение щелочной активации протекает полимеризация – формирование трехмерной структуры с зафиксированными в ней атомами натрия и калия. Значительные исследовательские усилия в области совершенствования состава и реологических свойств материалов позволили эффективно применять в качестве прекурсоров реакции получения геополимеров золу уноса [25], доменный шлак [26], шлаки цветной металлургии, измельченные отходы производства натриевого стекла, отработанную футеровку электролизеров производства алюминия, метакаолин, различные типы горных пород, вулканические агломераты, кремнеземы и др.

При соблюдении режима технологии получения геополимерных вяжущих, предложенной в работе [27], полученные геополимерные материалы и изделия из них характеризуются быстрым набором и высокой прочностью на одноосное сжатие, кислотостойкостью и долговечностью. Ключевым параметром, влияющим на ценность исходного материала для формирования геополимеров, является содержание активных оксидов кремния и алюминия, а также содержание стекловидной фазы и гранулометрический состав. Отношение содержания аморфных форм кремния к алюминию является определяющим фактором, влияющим на формирование геополимерной структуры и области его применения [28]. В этой связи была выдвинута гипотеза, что в качестве материалов для формирования изолирующих конструкций камер подземного блочного выщелачивания могут применяться геополимеры на основе вмещающих пород месторождений.

Методы. Для проведения работ по обоснованию и выбору изолирующих конструкций на геополимерной основе были разработаны программа и соответствующие методики исследований, включающие:

- исследование вещественного состава вмещающих пород месторождений для оценки содержания в них аморфной фазы в свете возможности формирования на их основе геополимерных материалов;
- расчет оптимальных составов, обеспечивающих формирование монолитных массивов с требуемыми свойствами;
- исследование прочностных и гидроизоляционных характеристик, химической и термической стойкости полученных массивов на основе пород месторождений;
- обоснование прикладных геотехнологических решений по изоляции камеры выщелачивания.

Таблица 1. Достоинства и недостатки существующих систем шахтного подземного выщелачивания и их комбинаций с технологиями подземной добычи руд
 Table 1. Advantages and disadvantages of existing in-situ mine leaching systems and their combinations with deep mining

Характеристика технологических процессов шахтного подземного выщелачивания		
№ п/п	Преимущества	Недостатки
1	Вовлечение в разработку разноразных, в том числе забалансовых, руд в недрах без выдачи на поверхность	Высокие потери руд в целиках (межблоковые целики, потолочины, днища блоков)
2	Экономичность и безопасность работ	Гидрогеохимическое воздействие агрессивных растворов на окружающую среду за пределами блоков подземного выщелачивания
3	Сопоставимая с традиционными технологиями нагрузка на окружающую природную среду, меньшая нагрузка на объекты поверхности	Практическая невозможность взрывной подготовки рудной массы до крупности, достижение высокого извлечения металлов
4	Возможность обрабатывать считавшиеся безвозвратно потерянными в охранных целиках, зонах обрушения, рудах после рудничных пожаров	Низкая эффективность решений, обеспечивающих эффективное высоко-, либо низкотемпературное бактериальное окисление рудной массы
5	Выдача на земную поверхность для переработки части горной массы по условию обеспечения компенсационного пространства для отбойки руд	Низкая эффективность решений, обеспечивающих улавливание и отвод газов, что особенно актуально при выщелачивании сульфидных руд
6	Заполнение образованных при отбойке руд пустот раздробленной горной массой, обеспечивающее дополнительную устойчивость выработанных пространств	Эффективность извлечения даже при оптимальных схемах взрывной отбойки не превышает 45%.

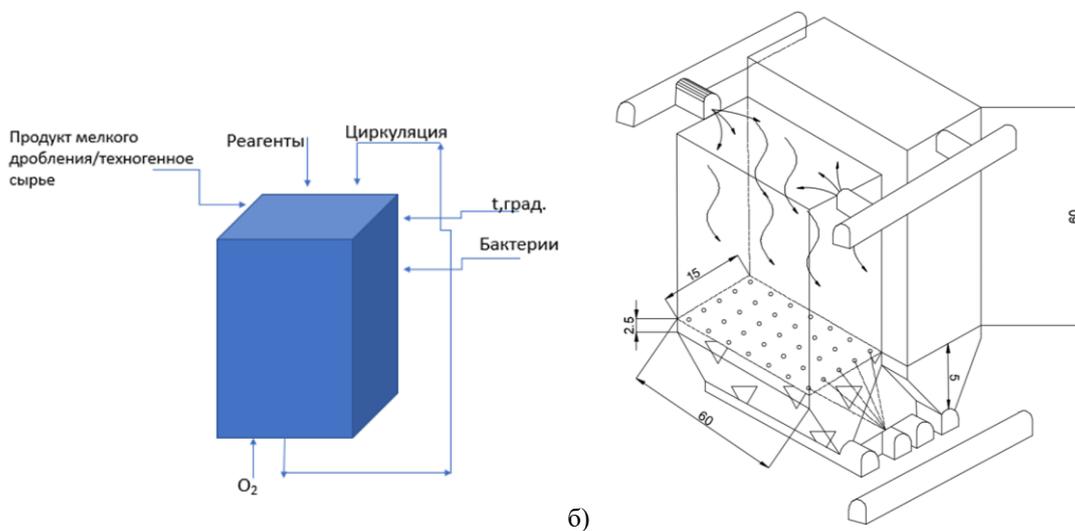


Рис. 1. Концепция (а) и пример создания (б) камер выщелачивания в отработанных камерах второй очереди при системах разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства
 Fig. 1. Concept (a) and example of creating (b) leaching chambers in produced primary stopes in stoping method with filling

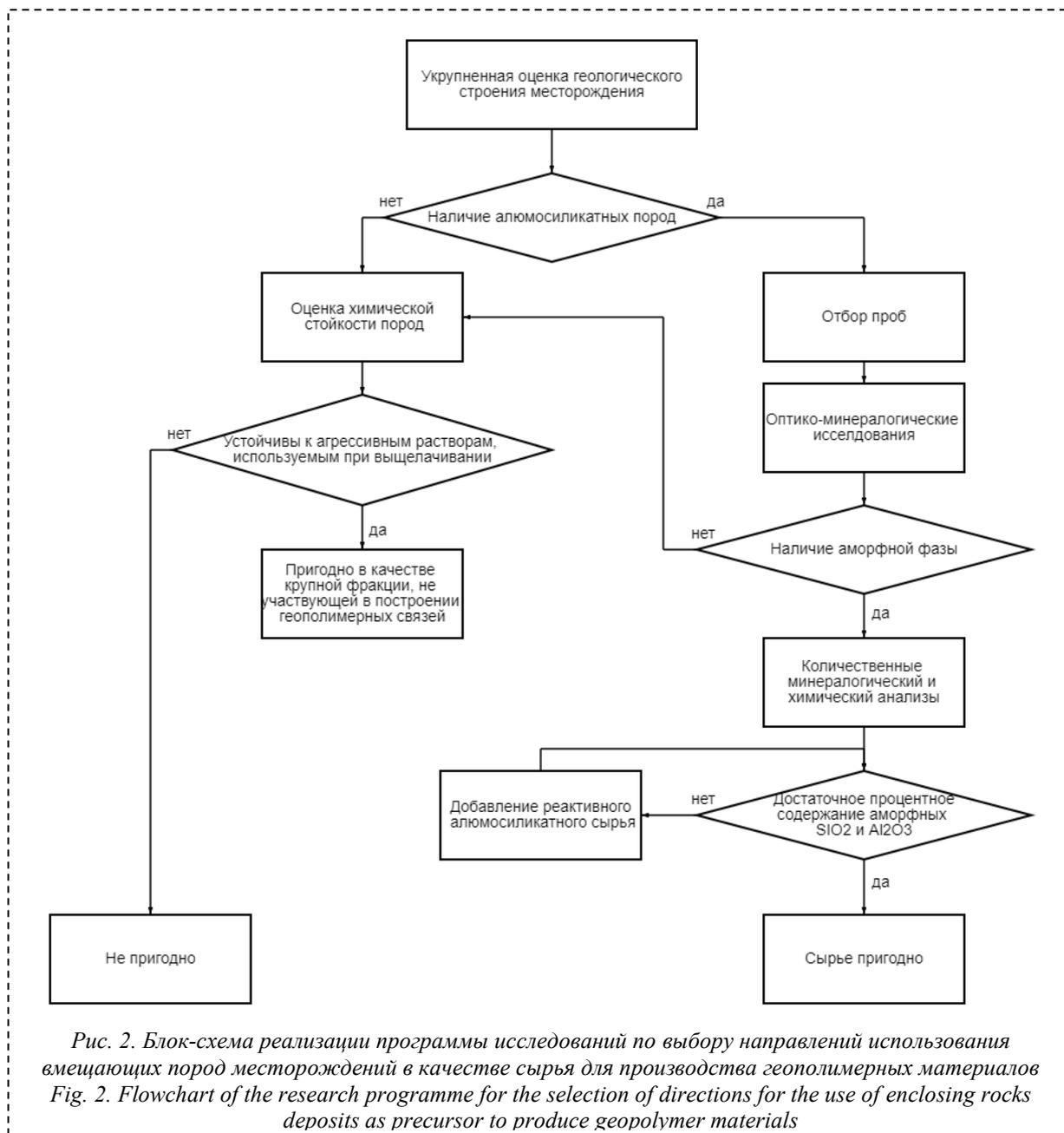
Комплекс указанных работ проведен на примере месторождений медно-колчеданных руд Южного Урала путем оценки возможности использования вмещающих пород в качестве компонентов геополлимерных смесей (Рис. 2). В первую очередь выполнено детальное изучение геологоразведочных данных с получением наиболее полной информации о горно-

геологических характеристиках рудовмещающей толщи с отбором представительных проб. На основе укрупненного анализа состава и условий залегания вмещающих пород, распространенных на месторождении, а также макроскопического описания произведена отбраковка образцов, представленных в минеральном отношении преимущественно кварцем и другими

кристаллическими формами кремнезема, ввиду их слабой реакционной способности в щелочной среде, а также пород с низким содержанием SiO_2 .

В соответствии с представленной на Рис. 2 программой исследования проведены оптико-минералогические исследования выбранных образцов для оценки наличия в них аморфного кремнезема, являющегося базовым условием формирования трехмерной структуры геополимера. Анализ текстуры пород в прозрачно-полированных шлифах выполнялся на микроскопе Olympus BX 51 в комбинированном отраженно-проходящем свете с применением программного комплекса по анализу изображений «Минерал С7». Далее отобранные

на первом этапе образцы подвергались анализу методом порошковой рентгеновской дифрактометрии с установлением количественного содержания аморфных фаз SiO_2 и Al_2O_3 . Проведение количественного химического анализа образцов выполнено в соответствии с нормативными документами № 138-Х, № 50-Х, № 172-С, № 502-С, № 120-Х, № 118-Х, № 197-Х и № 3-Х, разработанными ФБГУ «ВИМС». Эти методики включали определение содержания различных элементов, таких как кремний, титан, алюминий, железо, кальций, магний, марганец, калий, натрий, водород, фосфор и сера, а также анализ потерь при прокаливании.



Жидкий компонент для приготовления геополимерной смеси представляет собой водный щелочной раствор силикатов натрия и (или) калия, который может также быть получен путем смешивания строительного жидкого стекла и гранулированных КОН или NaOH. Причем при использовании силиката калия мольное

соотношение $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$ должно находиться в пределах от 1,5 до 1,7, при использовании силиката натрия соотношения $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ должно находиться в диапазоне 1,7 до 1,9 [27]. Развитие дешевых технологий получения жидкого стекла и образование его в качестве отходов в гидрометаллургии повышает привлекательность геополимерной технологии.

На основе полученных данных о твердом алюмосиликатном сырье и жидком компоненте производился количественный расчет компонентов смеси. Для получения геополимерных материалов со свойствами, отвечающими технологии подземного выщелачивания, при расчете компонентов должны выполняться следующие условия: мольное соотношение в смеси $\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O}):\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$; мольное соотношение в смеси $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$.

В случае недостаточного содержания аморфных фаз во вмещающих породах месторождения обеспечение необходимого соотношения достигается путем дополнительного добавления в состав смеси алюмосиликатного сырья, преимущественно отходов производства, таких как золы ТЭЦ, гранулированный шлак и т.д.

Приготовление смеси, отвечающей вышеуказанным условиям, выполнялось согласно схеме, представленной на Рис. 3.

Условия и программа проведения испытаний по оценке свойств геополимерных материалов, применяемых для изоляции камер подземного выщелачивания, выбраны с учетом режима выщелачивания и должны включать оценку гидроизоляционных характеристик, химической стойкости, термостойкости при максимально возможных температурах протекания процесса выщелачивания и требуемых прочностных характеристик.

Ввиду отсутствия нормативных документов и методик, регламентирующих порядок и методы испытаний геополимерных материалов, определение прочности на одноосное сжатие выполнено по ГОСТ 10180—2012. «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным

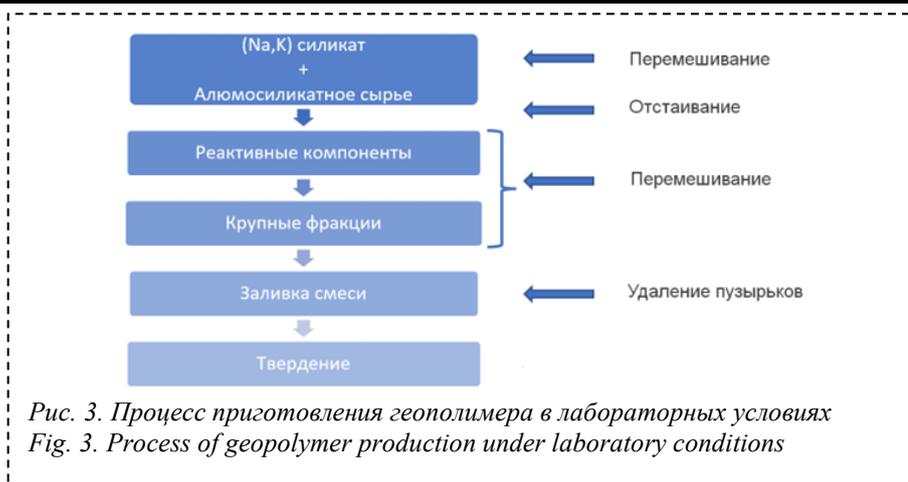


Рис. 3. Процесс приготовления геополимера в лабораторных условиях
Fig. 3. Process of geopolymer production under laboratory conditions

образцам». Контрольные образцы изготавливались в форме куба с длиной ребра 70 мм, число образцов в серии принималось равным 3. Испытание на одноосное сжатие производилось на лабораторном гидравлическом прессе Instron, обработка результатов выполнена в программном обеспечении Instron Bluehill Universal, растекаемость геополимерной смеси определялась с помощью вискозиметра Суттарда. Химическая стойкость материала определялась фактически установленным сохранением требуемых свойств под воздействием агрессивных кислот. Метод определения химической стойкости образца состоял в измерении прочности на одноосное сжатие в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58896-2020 до и после погружения в агрессивную среду. Гидроизоляционные характеристики определялись путем оценки водопоглощения образцов до и после выдержки в агрессивной среде (до 10% H_2SO_4), определяемой технологией сернокислотного выщелачивания. Отдельные образцы, выдержанные в кислоте, подвергались оценке водопоглощения по динамике изменения массы до и после насыщения водой.

Результаты исследования. В результате укрупненной геологической оценки месторождений медно-колчеданных руд Южного Урала выполнена систематизация рудовмещающих пород этих месторождений, которые зачастую представлены спилитами, липарит-дацитовыми кварцевыми порфирами, серицит-кварцевыми породами, дацитами, андезит-базальтовыми и базальтовыми порфирами, габбро-диабазами и туфами этих пород (Таблица 2). Кроме того, в условиях Южного Урала все рудные тела сопровождаются характерными изменениями приконтактных пород с широким развитием серицит-кварцевых и серицит-хлорит-кварцевых метасоматитов.

По результатам выполненной оценки среднего минерального и химического составов указанных пород можно предварительно заключить, что эффузивные породы кислого

состава, развитые на значительных площадях, требуют проведения дополнительных

Таблица 2. Систематизация вмещающих пород медно-колчеданных месторождений Южного Урала [29] с выделением потенциально пригодных для технологии геополимеров

Table 2. Systematization of host rocks of copper-cemented deposits of the Southern Urals [29] with identification of potentially suitable for geopolymers

Рудный район	Название месторождения	Типы горных пород
Бурибайский	Бурибайское	спилиты, туфы, субвулканические брекчии, серицит-хлорит-кварцевые породы, габбро-диабазы
	Маканское	серицит-кварцевые породы, туфы дацитовых порфиритов, андезит-базальтовые порфириты, диабазы
	Октябрьское	серицит-кварцевые метасоматиты, андезитовые порфириты, дацитовые порфириты
Домбаровский	Летнее	спилиты, базальтовые порфириты
	Весеннее	граниты, спилиты, базальтовые порфириты, липаритовые порфиры
Среднеорский	Приорское	базальтовые порфириты, спилиты, дацитовые и липарит-дацитовые порфиры, туфы кислого состава, серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты
	Месторождение им. 50-летия Октября	базальтовые афириты амфиболитизированные, эффузивы андезит-базальтового состава, антофиллитизированные эффузивы основного состава, кордиеритизированные вулканыты и кордиерит-кварцевые породы, биотит-хлоритовые и кварц-хлоритовые породы
Сибайский	Сибайское	спилиты, дациты, кварцевые порфиры и их туфы, кварцевые порфиры серицитизированные, кварцевые порфиры гематитизированные и окварцованные, спилиты гематитизированные, метасоматиты серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые
Гайский	Гайское	вулканыты основного состава, туфы кислого состава, брекчии дацитовых порфиритов, диабазы субвулканические, кислые породы субвулканические, метасоматиты серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые
Теренсайский	Джусинское	дацитовые порфириты и туфы, серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые сланцы, дайки диабазов и габбро-диабазов, дайки гранодиорит-порфиров
Учалинский	Учалинское	базальтовые порфириты, слоистые туфы основного состава, габбро, серицит-кварцевые и серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты
Медногорский	Блявинское	базальтовые порфириты, афириты, вариолиты, среднезернистые диабазы, крупнокварцевые липаритовые порфиры
	Комсомольское	базальтовые порфириты, афириты, вариолиты, туффиты, яшмы, углисто-глинистые сланцы, мелкокварцевые липаритовые порфиры, дацитовые порфириты, кварц-хлорит-серицитовые метасоматиты

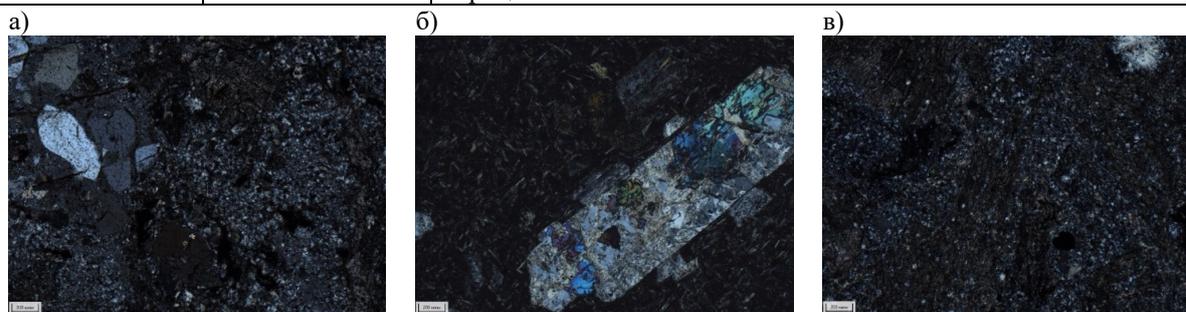


Рис. 4. Изображения шлифов горных пород в проходящем свете:
 а – серицит-кварцевые метасоматиты; б – туфы дацитов; в – дациты
 Fig. 4. Images of rocks in transmitted light:
 а – sericite-quartz metasomatites; б – tuffs of dacites; в – dacites

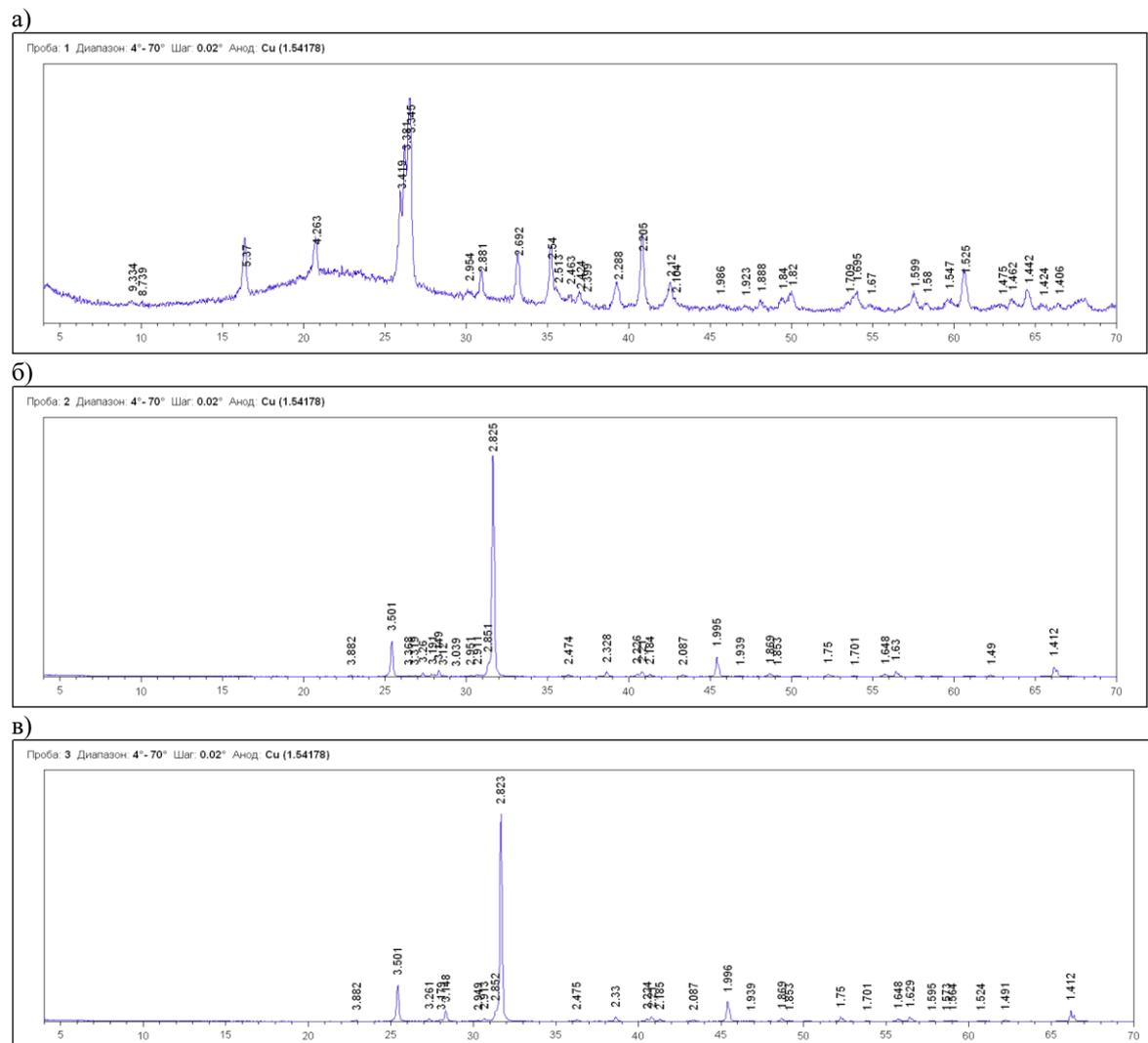


Рис. 5. Диффрактограммы проб исследуемых вмещающих пород: а – дацитов, б – серицит-кварцевых метасоматитов, в – туфов дацитов

Fig. 5. Diffractograms of samples of host rocks: а – dacites, б – sericite-quartz metasomatites, в – tuffs of dacites

исследований в связи с высоким содержанием в составе оксидов кремния и алюминия и вместе с тем кристаллических вкрапленников, снижающих реакцию способность. Метасоматически измененные породы не представляют интереса с позиции формирования геополлимерных связей ввиду низкой реакционной способности таких минералов, как кварц, серицит, хлорит, однако могут быть рассмотрены в качестве крупнокусковой фракции, не участвующей в построении геополлимерных связей. Возможность использования магматических пород основного состава может быть рассмотрена при включении в состав смеси значительного количества высокорективного алюмосиликатного сырья, способного обеспечить протекание реакции геополлимеризации. Таким образом, были выделены перспективные породы для формирования на их основе геополлимерных

смесей – дациты, туфы дацитов и серицит-кварцевые метасоматиты.

Результаты оптико-минералогических исследований этих пород позволили установить, что основная масса образца кварц-серицитового метасоматита сложена микрокристаллическим агрегатом хлорит-полевошпат-кварцевого состава среди отдельных таблитчатых зерен кварца (Рис. 4, а). На Рис. 4, б представлена стекловатая микрокристаллическая структура туфов дацита с порфиробластами плагиоклаза и его метасоматическим замещением кальцитом и калиево-полевым шпатом. Дациты характеризуются микрофельзитовой структурой, основная масса которого представлена материалом преимущественно хлорит-полевошпат-кварцевого состава (Рис. 4, в).

Наличие в дацитах аморфной фазы в наибольшем количестве подтверждено результатами проведенного дифрактометрического анализа. Сравнение

дифрактограмм, представленных на Рис. 5, показало наличие наибольшего нелинейного фона, характеризующего аморфную фазу, в образцах дацитов (Рис. 5а), тогда как образцы серицит-кварцевых метасоматитов и туфов дацитов более окристаллизованы и однородны по параметрам кристаллической решетки.

В результате количественной оценки содержания порообразующих элементов установлено, что все образцы характеризуются высоким содержанием SiO_2 в составе – от 60 до 68%, однако преобладание в туфах дацитов и серицит-кварцевых метасоматитах таких минералов, как кварц и слюды, а также низкое содержание аморфного оксида кремния – 6% и 7%, соответственно, снижает привлекательность их использования в качестве прекуроров геополимеров. Дациты сложены преимущественно такими минералами, как кварц и калиево-полево-шпат в равном количестве – 24%, плагиоклаз – 22% и хлорит – 15%. Содержание аморфного кремнезема в составе дацитов исследуемой пробы наиболее высоко и составляет 11%.

Несмотря на то, что в дацитах содержится наибольшее количество аморфной составляющей, ее все же недостаточно для производства геополимеров с соблюдением необходимых соотношений $\text{Na}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$, в связи с чем выполнен подбор оптимальной высокорективной добавки – золы уноса с высоким содержанием аморфной фазы – 63%.

Расчетным путем по зависимостям, принятым в технологии геополимеров [27], определен оптимальный состав геополимерной смеси, изолирующие конструкции на основе которой способны обеспечить требуемые для технологии блочного подземного выщелачивания свойства со следующим составом компонентов: дациты – 1457 кг/м^3 , зола – 350 кг/м^3 , жидкий компонент – 709 кг/м^3 .

Проведенные лабораторные исследования показали, что растекаемость расчетных геополимерных смесей составляет регламентируемые 160 мм и более. Растекаемость смесей в технологии подземных горных работ служит косвенной характеристикой их подвижности и может являться экспресс-методом стабильности выдерживания данного параметра в процессе распределения в камере. Вопрос интенсивного возведения горнотехнических конструкций на основе геополимеров непосредственно в подземном руднике базируется на применении передвижных закладочных комплексов (ПЗК) [30]. Смеси, произведенные с помощью ПЗК, подаются скважинами или по трубопроводам в камеру при подвижности 9–14 см (полное погружение эталонного конуса). Такая подвижность соответствует пятну растекаемости 16–20 см. Таким образом, полученная

геополимерная смесь отвечает технологическим требованиям к формированию литых массивов и может быть приготовлена с их помощью и подана в выработанное пространство.

Испытания прочностных характеристик лабораторных образцов позволили оценить характер их разрушения при сжатии в динамике в возрасте 7, 14, 30, 60 суток. Установлено, что прочность образцов геополимеров на основе вмещающих пород весьма высока и достигает на 60 сутки 22 МПа (Рис. 6а), что позволяет возводить основания камер выщелачивания различного конструктивного оформления и обеспечивает несущую способность таких конструкций практически в любых горно-геологических условиях. На начальном этапе твердения – до 7 суток – образцы еще подвержены пластическим деформациям, однако свыше этого срока, после полной геополимеризации, прочные образцы подвержены хрупкому разрушению. Установлено, что добавление крупнокусковой фракции оказывает значимое влияние на прочностные и деформационные характеристики, требуемые по фактору устойчивости днища камеры при реализации технологии выщелачивания в камерах. Вместе с тем добавление до 50% крупнокусковой фракции от объема позволяет получить высокие прочностные характеристики формируемых конструкций, свыше 13 Мпа, и модуль деформации свыше 290 МПа (Рис. 6а, б), что достаточно для формирования и эксплуатации днищ камер из геополимеров, а установленная возможность замещения геополимера крупнокусковой фракцией указывает на перспективы снижения себестоимости составов при изоляции камер.

Выполненное исследование убыли массы геополимеров исследуемого состава в условиях выдержки в 10%-ом растворе серной кислоты путем полного погружения в него на 14, 30 и 60 суток с постоянным контролем уровня кислотности среды показало, что образцы характеризуются незначительным снижением массы, не превышающим во всех случаях 0,7%. Прочность на одноосное сжатие образцов в возрасте 60 сут, погруженных в 10% раствор H_2SO_4 на 30 сут, составила до 22,4 МПа и во всех сериях опытов была сопоставима со значениями для образцов, не подверженных воздействию агрессивных сред.

Изучение влияния раствора серной кислоты на гидроизоляционные свойства геополимеров свидетельствует, что во всех случаях значение водопоглощения не превышает 1%. Оценка термостойкости показала, что высокотемпературный обжиг не приводит к снижению прочности материала на одноосное сжатие, и значение ее для образцов после набора

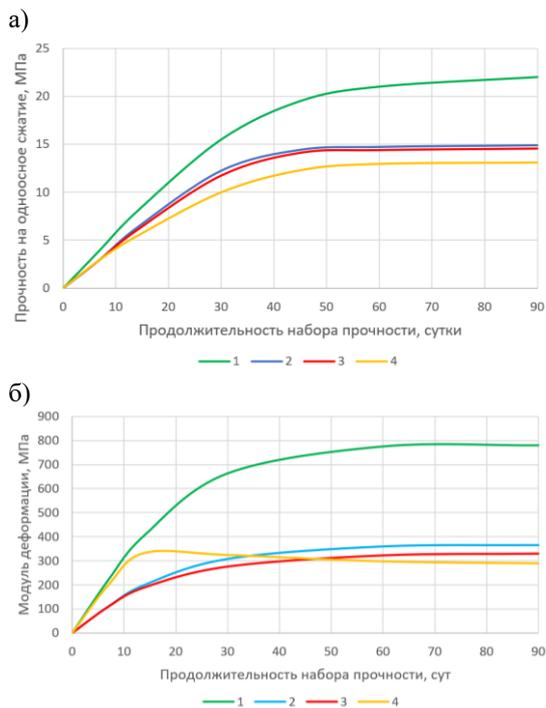


Рис. 6. Динамика набора прочности образцами геополимера на основе дацитов (а) и средние значения модуля деформации при одноосном сжатии (б): 1 – геополимерный массив; образцы с содержанием крупнокусковой фракции: 2 – 10%; 3 – 25%; 4 – 50%

Fig. 6. Dynamics of strength gain of dacite-based geopolymer samples (a) and average values of strain modulus in uniaxial compression (b): 1 – geopolymer array; samples with the content of coarse lump fraction: 2 – 10%; 3 – 25%; 4 – 50%



Рис. 7. Характер разрушения при одноосном сжатии образца геополимера в возрасте 60 сут (а) без термической обработки (б) и после обжига при температуре 600°C

Fig. 7. Fracture character under uniaxial compression of geopolymer sample at the age of 60 days (a) without heat treatment (b) and after firing at the temperature 600°C

прочности в течение 60 сут. составляет 22 МПа (Рис. 7).

Выводы. В целом выполненные исследования позволяют утверждать, что геополимерные массивы в достаточно короткие сроки, 60 суток, обеспечивают набор прочности свыше 20 МПа и устойчивы к воздействию кислоты. Это свойство делает их подходящим для использования в условиях агрессивных сред, так как сохраняется

их структурная целостность и функциональные характеристики. В технологическом плане это означает возможность своевременного планирования и подготовки камер выработанного пространства с сохранением структурной целостности для выщелачивания без конвергенции. Обязательным условием при этом является максимально возможное сокращение сроков отставания закладочных работ от очистных, что позволит вести работы по возведению геополимерного массива в максимально безопасных условиях. Однако перспектива реализации технологии блочного выщелачивания руд в специальных камерах в комбинации с традиционной камерной подземной добычей системами разработки с закладкой выработанного пространства возможна при принципиально новом подходе к первоначальной оценке и проектированию таких горнотехнических систем.

В условиях реализации указанной технологии меняются требования к качеству полезного ископаемого при выделении рудных зон с учетом возможности вовлечения в эксплуатацию низкосортных руд и применения отходов добычи в качестве исходного материала для изолирующих конструкций камер. Обеспечение требуемых объемов пород для создания непосредственно геополимерной смеси обеспечивается в ходе подготовительно-нарезных работ и может при необходимости быть увеличено за счет выбора направлений проходки выработок по определенным породам и намеренной прирезки пустых пород с целью использования их в качестве компонентов смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nicholas T. Amdt, Lluís Fontboté, Jeffrey W. Hedenquist et al. Future Global Mineral Resources // *Geochemical Perspectives*. 2017. Vol. 6. № 1. P. 171. DOI: 10.7185/geochemsp.6.1.
2. Колесникова Л. А. Анализ состояния окружающей среды в регионах с горнодобывающими предприятиями // *Уголь*. 2017. № 4 (1093). DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-4-68-69>.
3. Радченко Д. Н. Направления развития технологии шахтного подземного выщелачивания золота и полиметаллов // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век: Устойчивое развитие в условиях внешних и внутренних вызовов»*. М.: ИПКОН РАН, 2024. С. 46–48.
4. Ovalle A. In place leaching of a block caving mine // *Copper 87*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago: Universidad de Chile, 1987. Pp. 17–37.
5. Кротков В. В. [и др.] *Горно-химическая технология добычи урана*. М.: ГЕОС, 2001. 368 с.
6. Опыт выщелачивания урана на горнодобывающих предприятиях бывшего СССР: отчет о НИР / исполн.: ГУП НПО «Экогеоцентр». М.: 2000.
7. Bahamóndez, C., Arancibia, E., Castro, R., Vargas, T. In situ mining through leaching: Experimental methodology for evaluating its implementation and economic considerations // *Journal of the Southern African Institute of*

Mining and Metallurgy. 2016. Vol. 116. Pp. 689–698. DOI: 10.17159/2411-9717/2016/v116n7a11.

8. Мосинец В. Н., Лобанов Д. П., Тедеев М. Н. [и др.] Строительство и эксплуатация рудников подземного выщелачивания. М. : Недра, 1987. 303 с.

9. Овсейчук В. А., Резник Ю. Н., Мязин В. П. Геотехнологические методы добычи и переработки урановых и золотосодержащих руд: учеб. пособие. Чита : ЧитГУ, 2005. 328 с.

10. Лунев Л. И. Подземные системы выщелачивания металлов: учеб. пособ. М. : МГРИ, 1979. 86 с.

11. Djahanguiri F. D. F. D., Abel J. F. Design and Construction of a Bulkhead for a Simulated Underground Leaching Stope. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.911metallurgist.com/design-construction-bulkhead-underground-leaching-stope/>. Дата обращения: 16.02.2024.

12. Цой С. В., Катков Ю. А., Цой Д. Ю. Проектный эскиз подземного выщелачивания забалансовой медной руды Жезказганского месторождения и переработки продуктивных растворов // Изв. НТО "Кахак". 2016. С. 5–10.

13. Патент CN113202471B. Способ подземного блочного выщелачивания полезных ископаемых / Сунь Цзянь, Чжань Цзинь, Оу Реньцзе, Линь Вэйсин, Чжоу Ли, Чжу Чэньди; опубл. 01.04.2022.

14. Порцевский А. К. Геомеханическое обоснование выбора технологии подземной добычи руды с последующим использованием пустот: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2006. 258 с.

15. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Чжун Ч. Анализ опыта подготовки руд к подземному выщелачиванию // Горные науки и технологии. 2017. № 4. С. 13–22.

16. Порцевский А. К. Геомеханическое обоснование выбора технологии подземной добычи руды с последующим использованием пустот: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2006. 258 с.

17. Патент RU2506423 С1. Способ подземного блочного выщелачивания полезных ископаемых / Тедеев М. Н., Гнучева А. И.; опубл. 10.02.2014.

18. Shenxu Bao, Bo Chen, Yimin Zhang, Liuyi Ren, etc. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: Applications, mechanisms and prospects // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 98, 106525.

DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106525.

19. Иванов В. Г., Камнев Е. Н., Смагин А. П. Физико-химическая геотехнология урана на скальных месторождениях. М. : Атомная энергетика, 2009. 375 с.

20. Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н., Гаджиева Л. А. [и др.] Патент 2747275 С1. Способ подземного выщелачивания металлов из сульфидсодержащего минерального сырья. Опубл. 04.05.2021.

21. Croymans T., Schroevers W., Krivenko P., Kovalchuk O., Pasko A. Radiological characterization and evaluation of high volume bauxite residue alkali activated concretes // J. Environ. Radioact. 2017. Vol. 168. Pp. 21–29.

22. Lu C., Zhang Z., Shi C., Li N., Jiao D., Yuan Q. Rheology of alkali-activated materials: a review // Cement Concrete Compos. 2021. Vol. 121. Article 104061.

23. Mundra, H., Panchmatia P., Juenger M., van Oort E. Rheological properties of Class F fly-ash based alkali-activated materials (AAMs) for oil and gas well cementing applications // CEMENT. 2023. Vol. 12.

24. Davidovits J. Why Alkali-Activated Materials (AAM) are Not Geopolymers, Technical Paper #25, Geopolymer Institute Library [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.geopolymer.org. Дата обращения 24.10.2023.

25. Yiwei Yang, Bowen Wang, Qiaoming Yuan, Dunwen Huang, Hui Peng, Characterization, factors, and fractal dimension of pore structure of fly ash-based geopolymers // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 26. Pp. 3395–3407. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.157.

26. Janardhan P., Krishnaiah V. An improved mechanical behaviour of fly ash and GGBS based geopolymer concrete // Materials Today: Proceedings, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.142.

27. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications, 4th edition. Saint-Quentin : Institut Geopolymere, 2015. P. 644.

28. Xu H., van Deventer, J. S. J. Geopolymerisation of multiple minerals // Minerals Engineering. 2002. Vol. 15. Pp. 1131–1139.

29. Прокин В. А. Закономерности размещения колчеданных месторождений на Южном Урале. М. : Недра, 1977. 176 с.

30. Каплунов Д. Р. [и др.] Передвижные закладочные комплексы в системах разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств // Горный журнал. 2013. № 2. С. 101–104.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Федотенко Виктор Сергеевич, заместитель директора по научной работе, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, (111020, Россия, г. Москва, ул. Крюковский тупик, 4), доктор технических наук, e-mail: victorfedotenko@gmail.com

Радченко Дмитрий Николаевич, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, (111020, Россия, г. Москва, ул. Крюковский тупик, 4), доцент, кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1821-3840>, e-mail: mining_expert@mail.ru

Гаджиева Луиза Абду-Самадовна, младший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, (111020, Россия, г. Москва, ул. Крюковский тупик, 4), доцент, кандидат технических наук, e-mail: gadzhieva_l@ipkonran.ru

Заявленный вклад авторов:

Федотенко Виктор Сергеевич – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, написание текста.

Радченко Дмитрий Николаевич – постановка исследовательских задач, выполнение лабораторных исследований, анализ данных, написание текста.

Гаджиева Луиза Абду-Самадовна – выполнение лабораторных исследований, анализ данных, написание текста.

.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

SELECTION OF GEOPOLYMER MATERIAL COMPOSITION FOR ISOLATION OF MINING STRUCTURES DURING IN-SITU MINE LEACHING

Victor S. Fedotenko, Dmitry N. Radchenko
Luiza A.-S. Gadzhieva*

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences

*for correspondence: gadzhieva_l@ipkonran.ru

**Article info**

Received:

27 May 2024

Accepted for publication:

25 July 2024

Accepted:

29 August 2024

Published:

26 September 2024

Keywords: *In-place leaching; reactor chamber; insulation; stability of mining structures; acid resistance; geopolymer; dacite; comprehensive exploitation of mineral resources.*

Abstract.

Based on the review and analysis of modern methods of in-situ (block) leaching, it has been established that the most significant disadvantages limiting the application of this technology are the high risk of migration of aggressive solutions, high ore losses in pillars and the practical impossibility of explosive preparation of ore mass to the size required to achieve a high level of metal recovery. To solve these problems, the technology of in-situ leaching in chambers specially created in the subsurface and designed for loading ores with non-ferrous metals and their subsequent leaching in underground conditions was proposed. The efficiency of the proposed technology is largely determined by the possibility of isolating the working space by creating special structures with the required characteristics in the walls and base of the chamber. The article presents the results of the study of host rocks of copper and cobalt ore deposits in the light of the possibility of forming geopolymeric materials on their basis, characterised by the required strength, hydro-, thermal-, acid-resistant properties.

As a result of laboratory research, it was established that host rock geopolymers are characterised by high strength characteristics - up to 22 MPa, resistance to sulphuric acid concentration up to 10%, low water absorption and resistance to high temperatures up to 600°C.

For citation: Fedotenko V.S., Radchenko D.N., Gadzhieva L.A.-S. Selection of geopolymer material composition for isolation of mining structures during in-situ mine leaching. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 4(164):125-137. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-125-137, EDN: MBTYZY

REFERENCES

- Nicholas T. Arndt, Lluís Fontboté, Jeffrey W. Hedenquist [et al.] Future Global Mineral Resources. *Geochemical Perspectives*. 2017; 6(1):171. DOI: 10.7185/geochempersp.6.1.
- Kolesnikova L.A. Analysing the state of the environment in the regions with mining enterprises. *Ugol*. 2017; 4(1093). DOI: 10.18796/0041-5790-2017-4-68-69.

- Radchenko D.N. Directions of development of technology of mine in-situ leaching of gold and polymetals. Materials of the All-Russian scientific-practical conference "Gold. Polymetals. XXI century: Sustainable development in the conditions of external and internal challenges". M.: IPKON RAN; 2024. Pp. 46–48.

4. Ovalle A. In place leaching of a block caving mine. Copper 87. Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas. Santiago: Universidad de Chile; 1987. Pp. 17–37.
5. Krotkov V.V. [et al.] Mining and chemical technology of uranium mining. M.: GEOS; 2001. 368 c.
6. Experience of uranium leaching at the mining enterprises of the former USSR: research report / executed: State Unitary Enterprise Scientific and Production Centre "Ecogeocenter". M.: 2000.
7. Bahamóndez, C., Arancibia, E., Castro, R., Vargas, T. In situ mining through leaching: Experimental methodology for evaluating its implementation and economic considerations. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016; 116:689–698. DOI: 10.17159/2411-9717/2016/v116n7a11.
8. Mosinets V.N., Lobanov D.P., Tedeev M.N. [et al.] Construction and operation of in-situ leaching mines. M.: Nedra; 1987. 303 p.
9. Ovseichuk V.A., Reznik Y.N., Myazin V.P. Geotechnological methods of mining and processing of uranium and gold-bearing ores: textbook. Chita: ChitSU; 2005. 328 c.
10. Lunev L.I. Underground systems of metal leaching: textbook. M.: MGR; 1979.
11. Djahanguiri F.D. F.D. and Abel, J.F. Design and Construction of a Bulkhead for a Simulated Underground Leaching Stope. <https://www.911metallurgist.com/design-construction-bulkhead-underground-leaching-stope/>.
12. Tsoi S.V., Katkov Yu.A., Tsoi D.Yu. Design sketch of in-situ leaching of off-balance copper ore of Zhezkazgan deposit and processing of productive solutions. *Izv. STO "Kahak"*. 2016. Pp. 5–10.
13. Patent CN113202471B. Method of underground block leaching of minerals / Sun Jian, Zhan Jin, Ou Renjie, Lin Weixing, Zhou Li, Zhu Chengdi; published 01.04.2022.
14. Portsevskiy A.K. Geomechanical substantiation of the choice of underground ore mining technology with subsequent use of voids: thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Moscow, 2006.
15. Golik V.I., Razorenov Y.I., Zhong C. Analysis of the experience of ore preparation for in-situ leaching/ *Mining Science and Technology*. 2017; 4:13–22.
16. Portsevskiy A.K. Geomechanical substantiation of the choice of underground ore mining technology with subsequent use of cavities: thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Moscow, 2006.
17. Patent RU2506423 C1. Method of underground block leaching of minerals / Tedeev M.N., Gnucheva A.I.; published 10.02.2014.
18. Shenxu Bao, Bo Chen, Yimin Zhang, Liuyi Ren, etc. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: Applications, mechanisms and prospects. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023; 98:106525. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106525.
19. Ivanov V.G., Kamnev E.N., Smagin A.P. Physico-chemical geotechnology of uranium at rocky deposits. Moscow: Atomnaya Energetika; 2009.
20. Patent 2747275 C1. Method of underground leaching of metals from sulfide-containing mineral raw materials / Kaplunov D.R., Radchenko D.N., Gadzhieva L.A. [et al]; published 04.05.2021.
21. Croymans T., Schroyers W., Krivenko P., Kovalchuk O., Pasko A. Radiological characterization and evaluation of high volume bauxite residue alkali activated concretes. *J. Environ. Radioact.* 2017; 168:21–29.
22. Lu, C., Zhang, Z., Shi, C., Li, N., Jiao, D., & Yuan, Q. Rheology of alkali-activated materials: a review. *Cement Concrete Compos.* 2021; 121:104061.
23. Mundra H., Panchmatia P., Juenger M., van Oort E. Rheological properties of Class F fly-ash based alkali-activated materials (AAMs) for oil and gas well cementing applications. *CEMENT*. 2023; 12.
24. Davidovits. J. Why Alkali-Activated Materials (AAM) are Not Geopolymers, Technical Paper #25, Geopolymer Institute Library. www.geopolymer.org.
25. Yiwei Yang, Bowen Wang, Qiaoming Yuan, Dunwen Huang, Hui Peng, Characterization, factors, and fractal dimension of pore structure of fly ash-based geopolymers. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 26:3395–3407. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.157.
26. Janardhan P., Krishnaiah V. An improved mechanical behaviour of fly ash and GGBS based geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.142.
27. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications, 4th edition. Saint-Quentin: Institut Gopolymure; 2015.
28. Xu H., van Deventer J.S.J. Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering*. 2002; 15:1131–1139.
29. Prokin V.A. Regularities of the location of sulphide deposits in the Southern Urals. Moscow: Nedra; 1977. 176 c.
30. Kaplunov D.R. [et al.] Mobile backfilling complexes in the systems of ore deposits development with backfilling of excavated spaces. *Gornyj Zhurnal*. 2013; 2:101–104.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Victor S. Fedotenko, Patronymic, position, Organization name, (000000, Country, City, Street, 1), academic degree, academic title, ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, e-mail: mail@mail.ru

Dmitry N. Radchenko, lead researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (111020, Russia, Moscow, Kryukovsky tupik, 4), Ph.D. in Engineering, associate professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, e-mail: mining_expert@mail.ru

Luiza A.-S. Gadzhieva, junior researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (111020, Russia, Moscow, Kryukovsky tupik, 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, e-mail: gadzhieva_1@ipkonran.ru

Contribution of the authors:

Victor S. Fedotenko – research problem statement; scientific management, drawing the conclusions, writing the text.

Dmitry N. Radchenko – conceptualisation of research, researching, data analysis, writing the text.

Luiza A.-S. Gadzhieva – researching, data analysis, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

