

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 625.814 : 691.41 : 544.032.2

УТИЛИЗАЦИЯ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД В СОСТАВАХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОРОГ ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Д. В. Бесполитов, Н. А. Коновалова, П. П. Панков, Н. Д. Шаванов

*Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро “ЗабИЖТ-Инжиниринг”
Забайкальского института железнодорожного транспорта,
E-mail: zabizht_engineering@mail.ru, ул. Магистральная, 11, 672040, г. Чита, Россия*

Рассмотрена возможность крупнотоннажного прямого использования вскрышных пород в составах композитов для устройства конструктивных слоев технологических дорог горнорудных предприятий. Установлено, что вскрышные породы, модифицированные механически активированной золой уноса и стабилизирующей добавкой полимерной природы, имеют прочностные характеристики, соответствующие требованиям ГОСТ 23558-94, и обладают повышенными сроками обеспыливающего действия. Выявлено, что оптимальное содержание вяжущего и золы уноса в образцах составило 8 и 10 масс. % соответственно. Показано, что механическая активация золы в течение 1 мин способствует увеличению ее удельной поверхности в 2 раза. Морозостойкие композиты, модифицированные механически активированной золой и стабилизирующей добавкой (1 масс. %), имеют марки по прочности М20 – М40.

Технологические дороги, обеспыливание, утилизация отходов, вскрышные породы, зола уноса, механическая активация, композиционные материалы, стабилизирующая добавка

DOI: 10.15372/FTPRI20230118

Регионы с развитой горной промышленностью, на долю которой приходится свыше 80 % всех крупнотоннажных отходов, характеризуются наличием острых экологических проблем [1, 2]. Складирование в отвалах вскрышных и вмещающих пород, извлекаемых в результате добычи минерального сырья, наносит значительный ущерб окружающей среде и способствует ухудшению санитарно-гигиенических условий жизни населения на прилегающих территориях [3 – 6].

Транспортная сеть горнорудных предприятий представлена конструкциями дорог с переходным и низшим типами дорожных одежд (щебеночные, гравийные, грунтовые). Установлено, что содержание пыли в воздухе на карьерных дорогах с щебеночным и гравийным покрытиями достигает 110–250 мг/м³ [7]. Пылеобразование способствует формированию профессиональных заболеваний персонала, снижает скорость движения и производительность автотранспорта, приводит к износу деталей и узлов техники. Интенсивность выделения пыли на дорогах составляет 0.014 кг/с, 90–98 % частиц имеют размер менее 10 мкм [8]. Микроразмерные частицы максималь-

но опасные, так как обладают способностью свободно проникать в живые организмы и вызывают заболевания органов дыхания и сердечно-сосудистой системы [9, 10]. Разработка способов крупнотоннажного прямого использования вскрышных пород в составах дорожно-строительных композиционных материалов обеспыливающего действия позволит решить комплекс острых экологических проблем горнорудных предприятий.

Вскрышные породы являются техногенными грунтами, обладающими комплексом отрицательных для дорожного строительства свойств. Модификация минерального сырья стабилизирующими добавками позволяет изменить строительные свойства техногенного грунта посредством омоноличивания раздробленных частиц. Следует отметить качественное отличие процессов взаимодействия с различными вяжущими и добавками в силу большой удельной поверхности дисперсных частиц техногенного минерального сырья [11, 12].

Научными школами В. М. Безрука, В. В. Охотина и М. М. Филатова разработаны методы направленного изменения физико-механических свойств техногенных грунтов для дорожного строительства. Методология изменения строительных свойств техногенных грунтов и методы получения дорожных оснований и покрытий на их основе представлены в [13]. Способы модификации грунтов с использованием неорганических вяжущих отражены в [14].

Теоретические исследования П. А. Ребиндера и А. В. Николаева по приданию техногенным грунтам водонепроницаемости и механической прочности послужили основой для разработки инструкций по улучшению их физико-механических свойств. Разработкой методологии химической стабилизации техногенных грунтов с учетом коэффициента фильтрации занимались советские ученые [15–18], изучению свойств цементогрунтов посвящены работы зарубежных авторов [19–21]. К середине XX в. разработаны методы получения грунтовых композитов, модифицированных органическими (смолы, нефтяные гудроны, битумы, дегти и др.) и неорганическими вяжущими материалами (цемент, известь и др.).

Проведенный патентный поиск свидетельствует об эффективности методов обеспыливания, заключающихся в изменении коллоидно-химических свойств грунта введением минерального вяжущего и стабилизирующих добавок различной природы (пылезакрепление). Известно, что укрепленные грунты в конструктивных слоях покрытия соответствуют невысоким маркам по прочности и морозостойкости из-за присутствия в их составе глинистых минералов. Однако прочность укрепленных грунтов играет немаловажную роль, поскольку карьерные дороги эксплуатируются с применением тяжелой техники. Актуальным становится получение составов укрепленных грунтов с длительными сроками пылеудерживающего действия без потери прочностных характеристик.

Цель настоящей работы — разработка составов композиционных материалов обеспыливающего действия на основе вскрышных пород, модифицированных стабилизирующими добавками различной природы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования выбраны крупнотоннажные отходы золотодобычи — вскрышные породы Тасеевского, Балейского и Каменского карьеров (Забайкальский край). Для комплексной модификации вскрышных пород использовалась механически активированная зола уноса, отобранная на ТЭЦ-2 г. Читы (Забайкальский край), портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32.5Б и стабилизирующая добавка на основе высокомолекулярных поверхностно-активных веществ — продуктов гидролиза поливинилацетата и поли(2-пропенамида).

Мультиэлементный анализ минерального сырья проводился с привлечением метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) посредством спектрометра эмиссионного Optima 5300DV (Perkin Elmer) 167–403 нм. Фазовый состав мине-

рального сырья устанавливался с помощью метода порошковой дифракции (рентгеновский дифрактометр ДРОН-3.0, излучение — $\text{CuK}\alpha$, Ni-фильтр, $2\theta = 5 - 55^\circ$, шаг сканирования — 0.05° , $I = 20$ мА, $U = 25$ кВ), минералогический состав расшифровывался с привлечением программы EVA DiffraPlus (PDF-2). Термический анализ минерального сырья осуществлялся методом дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии (ДСК и ТГ) на синхронном термоанализаторе STA 449F1 NETZSCH (навеска 30 мг, нагревание в области температур 30–800 °С, скорость 10 °С/мин, динамическая атмосфера аргона).

Инфракрасные спектры регистрировались на таблетках KBr с помощью фурье-спектрометра FTIR-8400S (SHIMADZU). Расчет относительной интенсивности полос поглощения выполнялся с привлечением метода базисных линий, в качестве единицы выбиралась полоса поглощения с максимумом 1000–1100 см^{-1} . Микроструктурные особенности минерального сырья изучались на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV·JEOL с системой микроанализа энергодисперсионного рентгеновского спектрометра INCA Energy 350 (Oxford Instruments), тонкий слой платины на непроводящий образец напылялся установкой JFC-1600.

Особенности фазового состава золы уноса определялись на рентгеновском дифрактометре Bruker AXS D8 Advance (излучение — $\text{CuK}\alpha$, шаг сканирования — 0.02° с экспозицией 1 с/шаг, щели Соллера — 2.5 мм, радиус гониометра — 250 мм, зеркало Гёбеля, сцинтилляционный счетчик, $2\theta = 3 - 60^\circ$, $I = 40$ мА, $U = 40$ кВ). Показатель удельной эффективной активности естественных радионуклидов в образцах минерального сырья исследовался на спектрометре-радиометре бета- и гамма-излучений РАДЭК МКГБ-01 и гамма спектрометре РАДЭК МКСП-01 в соответствии с требованиями ГОСТ 30108-94 и СанПиН 2.6.1.2523-09.

Механоактивация золы проводилась в атмосфере воздуха в течение 1 мин на чашевом вибрационном истирателе ИВЧ-3 с дозой подведенной механической энергии 0.72 кДж/г. Навеска пробы в одном размольном стакане составила 50 г, соотношение массы навески к массе размольных тел 1:32. Образцы композиционных материалов на основе вскрышных пород изготавливались с учетом требований ГОСТ 23558-94.

Показатель удельной эффективной активности естественных радионуклидов $A_{\text{эфф}}$ в образцах вскрышных пород составил, Бк/кг: 96 ± 9 (Тасеевский карьер); 130 ± 12 (Каменский карьер); 167 ± 14 (Балейский карьер), что позволяет отнести минеральное сырье по радиационному фактору к I классу материалов (≤ 740 Бк/кг). В соответствии с требованиями ГОСТ 30108-94 и СанПиН 2.6.1.2800-10 вскрышные породы можно использовать в строительной индустрии без ограничений.

Результаты мультиэлементного анализа вскрышных пород приведены в табл. 1. Полученные данные свидетельствуют о превышении предельно допустимых концентраций (ПДК) хрома и цинка в составе вскрышных пород Тасеевского, Каменского и Балейского карьеров, мг/кг: Cr — 780, 400 и 440; Zn — 177, 53 и 76 соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав вскрышных пород, масс. %

Карьер	MnO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	п.м.	п.п.п.
Тасеевский	—	0.1	0.1	0.3	0.4	0.6	1.5	2.1	12.6	67.0	5.9	9.3
Каменский	0.1	0.1	2.5	0.9	0.5	0.4	2.7	3.6	12.1	67.6	5.7	3.7
Балейский	0.1	0.2	1.1	1.4	1.2	0.4	3.5	4.2	12.8	62.1	5.9	7.0

Примечание: п. м. — примеси микроэлементов; п. п. п. — потери при прокаливании

На термограммах вскрышных пород первый эндотермический минимум связан с удалением адсорбционной воды и наблюдается при 141, 161, 146 °С для пород Балейского, Каменского и Тасеевского карьеров соответственно. О присутствии в них кварца свидетельствует характерный небольшой эндоэффект при 576, 576 и 566 °С. Потеря массы для перечисленных пород

при 997 °С составляет 6.31, 3.45 и 10.01 % соответственно. Эндозффект при 161 °С у вскрышной породы Каменского карьера отличается широкой формой и сопровождается незначительной потерей веса ~0.6 %, что в 3–4 раза меньше, чем аналогичные эффекты на термограммах пород Балецкого и Тасеевского карьеров.

Многочисленные полосы поглощения с максимумами в области 3393–3694 см⁻¹ (Тасеевский карьер), 3621–3696 см⁻¹ (Каменский карьер), 3403–3744 см⁻¹ (Балецкий карьер) в ИК-спектре вскрышных пород соответствуют валентным колебаниям Н–О–Н и Si–O–H-групп. Наличие полос поглощения при 1000–1100 см⁻¹ указывает на валентные колебания связи Si–O–Si. Полосы поглощения с максимумами в области 900–950 см⁻¹ вызваны валентными колебаниями связи Si–O–Al. Полоса поглощения при 795 см⁻¹ доказывает присутствие в пробе кварца, а полосы с максимумами в области 473 и 538 см⁻¹ свидетельствуют о деформационных колебаниях связи O–Si–O.

Данные, полученные методом порошковой дифракции, позволили установить, что в состав вскрышных пород Тасеевского карьера (рис. 1а) входят: иллит K_{0.7}Al_{2.1}(Si, Al)₄O₁₀(OH)₂ (3.30; 4.38; 5.16 Å); кварц SiO₂ (2.13; 2.46; 3.36 Å) и каолинит Al₂Si₂O₅(OH)₄ (2.34; 2.57; 7.23 Å). Рентгенофазовый анализ пород Каменского карьера (рис. 1б) показывает наличие в образцах кварца SiO₂ (1.98; 2.28; 2.46 Å); гематита Fe₂O₃ (2.70 Å); альбита NaAlSi₃O₈ (2.93; 3.77; 6.42 Å); каолинита Al₂(Si₂O₅)(OH)₄ (3.19; 3.58; 7.18 Å); микроклина KAlSi₃O₈ (2.89; 3.24; 4.04 Å) и иллита (K, H₃O)Al₂Si₃AlO₁₀(OH)₂ (2.00; 3.19; 10.05 Å). В состав вскрышных пород Балецкого карьера (рис. 1в) входят: кварц SiO₂ (2.46; 2.28; 1.98 Å); альбит NaAlSi₃O₈ (3.78; 3.19; 2.56 Å); микроклин KAlSi₃O₈ (3.48; 3.24; 2.90 Å); иллит (K, H₃O)Al₂Si₃AlO₁₀(OH)₂ (10.05; 5.00; 2.90 Å); каолинит Al₂(Si₂O₅)(OH)₄ (7.16; 3.58; 1.67 Å).

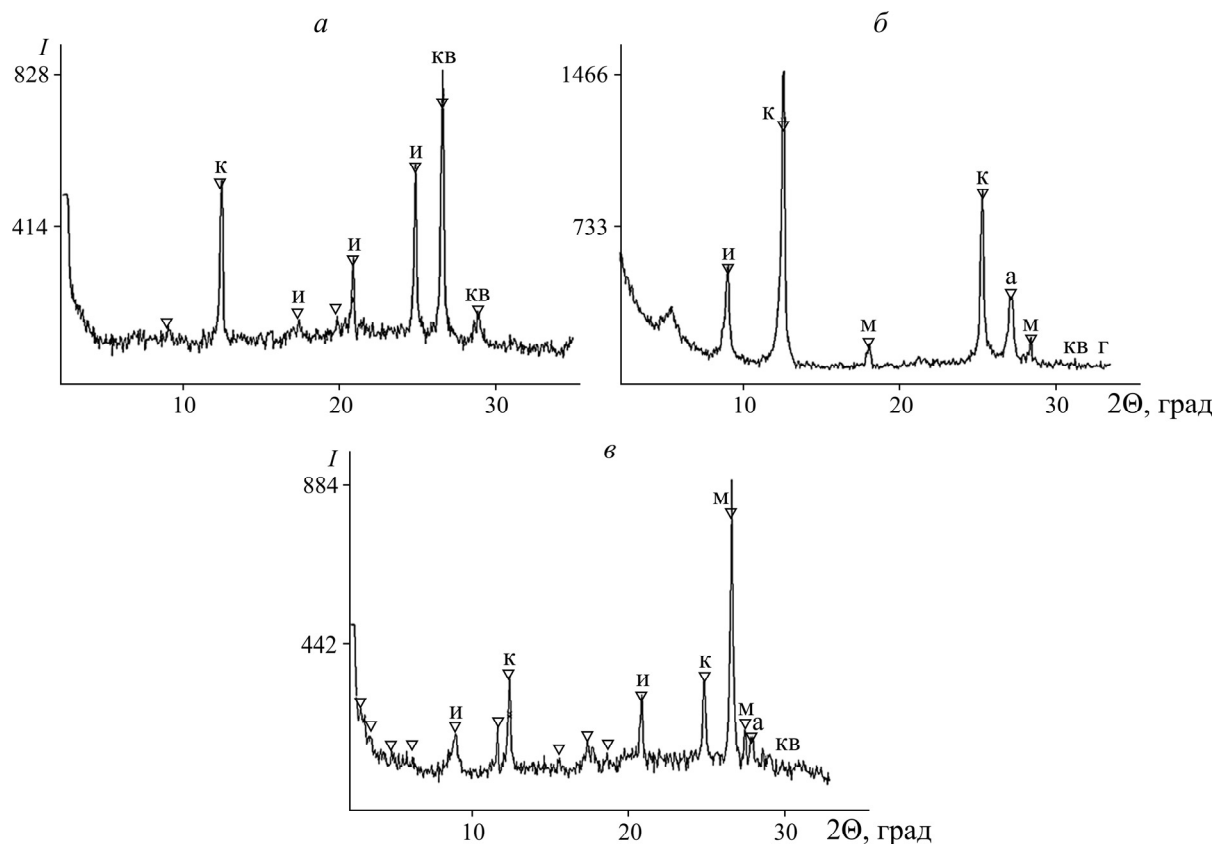


Рис. 1. Дифрактограммы вскрышных пород Тасеевского (а), Каменского (б), Балецкого (в) карьеров: к — каолинит; кв — кварц; и — иллит; а — альбит; м — микроклин; г — гематит

Установлено, что вскрышная порода Тасеевского карьера отличается повышенным содержанием кварца и меньшим количеством фаз, вскрышная порода Бaleyского карьера содержит меньше глинистых минералов — каолинита и иллита.

Методом растровой электронной микроскопии установлены микроструктурные особенности строения вскрышных пород, содержащих песчаные и глинистые фракции с размерами частиц 100–392 мкм (рис. 2).

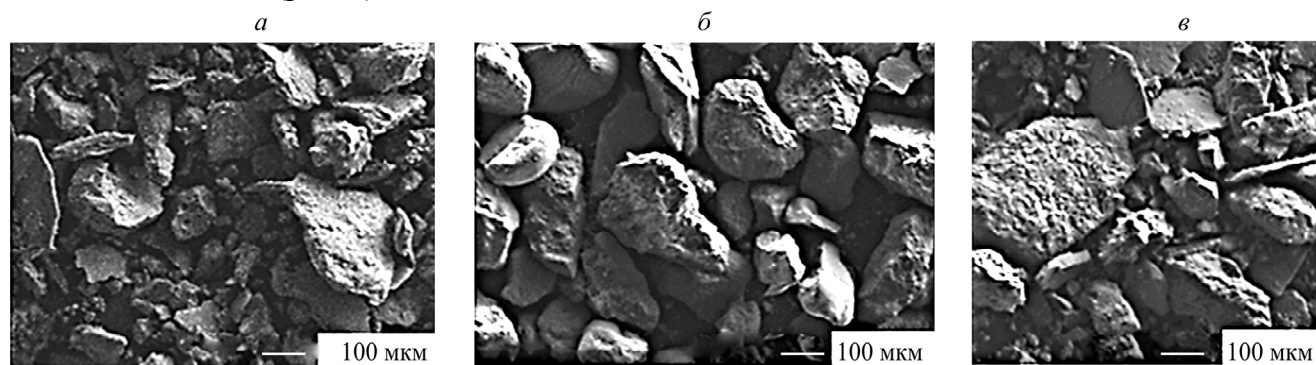


Рис. 2. Микрофотографии вскрышных пород Тасеевского (а), Каменского (б), Бaleyского (в) карьеров

Данные ИСП-АЭС свидетельствуют о содержании в составе золы уноса, масс. %: 0.2 Na₂O; 0.3 MnO; 0.4 CaO_{св}; 0.6 SO₃; 0.7 SO₃; 1.1 C; 1.2 TiO₂; 1.4 MgO; 1.4 K₂O; 8.5 Fe₂O₃; 9.2 CaO; 20.6 Al₂O₃; 53.0 SiO₂; 1.8 п. п. п. С помощью рентгенофазового анализа установлено, что зола содержит полевой шпат, кальцит, кварц, гетит и рентгеноаморфную фазу. На ИК-спектре приведены соответствующие характеристические частоты минеральных составляющих, см⁻¹: 461 (δ Si-O-Si(Al)); 563 (δ Fe-O-Fe); 692, 671 (ν SiO₂); 797, 779 (ν SiO₂); 876 (δ CO₃²⁻); 1092 (ν Si-O-Si(Al)); 1454, 1435 (ν CO₃²⁻); 3458 (ν OH). Показатель удельной эффективной активности естественных радионуклидов (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K) составил 248 Бк/кг. Зола уноса по гидравлическим свойствам относится к скрыто-активной категории.

Установлено, что в составе портландцемента содержатся, масс. %: 2.80 SO₃; 4.04 MgO; 4.41 Fe₂O₃; 6.75 Al₂O₃; 27.90 SiO₂ и 36.55 CaO. Фазовый состав портландцемента: кварц SiO₂ (1.82; 2.11; 2.21; 2.32; 2.44; 3.35 Å); алит Ca₃SiO₅ (2.18; 2.74; 2.97; 3.03; 5.95 Å), портландит Ca(OH)₂ (2.65; 3.19 Å), белит Ca₂SiO₄ (1.76; 2.28; 2.81; 2.88; 3.43 Å).

Стабилизирующая добавка — вязкая прозрачная жидкость (плотность 1.20 г/см³) с реакцией среды pH 8. Полосы поглощения в ИК-спектре добавки, см⁻¹: 600 (δ CO); 851 (γ OH); 918 (ν C-C); 1094, 1139 (ν C-O-C); 1238 (γ CH); 1329 (δ CH+OH, δ CN); 1418, 1446 (δ CH₂); 1564 (δ NH); 1620 (δ OH); 1663 (ν C=O); 2913, 2942 (ν _{a+s}CH₂); 3352 (ν NH, OH); 3728 (ν OH) (рис. 3а).

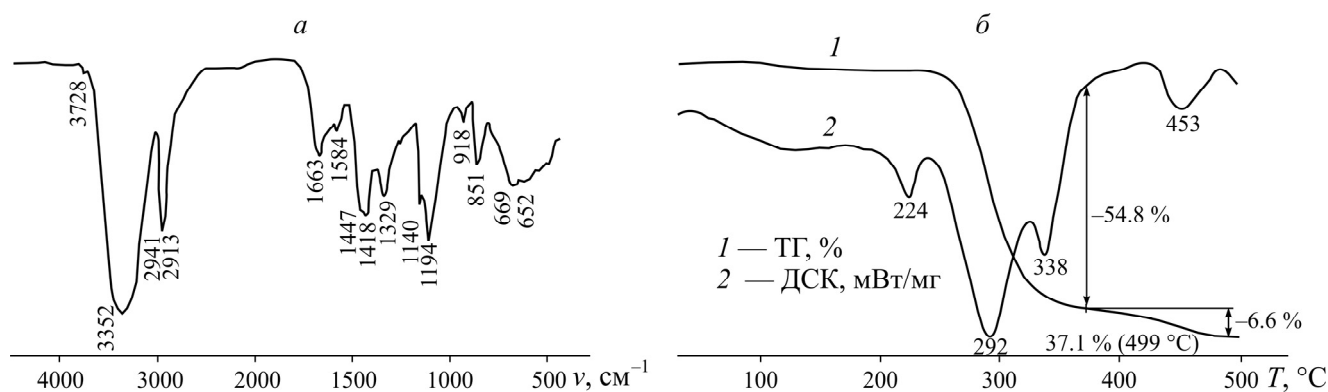


Рис. 3. Стабилизирующие добавки: а — ИК-спектр; б — ДСК-, ТГ-кривые

Методом ДСК и ТГ обнаружены четыре эндотермических эффекта при 453; 338; 292 и 224 °С. Эндоэффекты при 224, 292 и 338 °С (рис. 3б) характеризуются потерей массы на 55 %. Процессы плавления и термической деструкции полимера сопровождаются четко выраженными эндоэффектами при 225; 292 и 338 °С. Процесс декарбонизации подтверждается наличием размытого эндоэффекта при 453 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С целью повышения активности инертных или скрыто-активных зол применяются методы механической активации [22], которые способствуют увеличению удельной поверхности и реакционной способности материала за счет количественного накопления дефектов его структуры.

Известно, что время механоактивации зол уноса может варьироваться в пределах 60–600 с [23–25] или 900–1200 с [22]. Увеличение длительности механической активации не всегда имеет экономическую целесообразность, снижает прочностные характеристики композитов и эффективность процесса в целом [24].

Неоднородность состава зол уноса ограничивает возможности их утилизации при производстве материалов дорожно-строительного назначения. Применение технологии механохимической активации, позволяющей обеспечить достаточную дозу механической энергии и наименьшую энергозатратность, может способствовать гомогенизации неоднородного состава золы уноса. При получении композиционных материалов на основе вскрышных пород очевидна целесообразность применения золы уноса, механоактивированной в течение 1 мин.

На рис. 4 представлены рентгеновские дифрактограммы и ИК-спектры исходной (кривая 1) и механоактивированной (кривая 2) золы. Механоактивация золы уноса сопровождается процессами карбонизации и дегидратации, что подтверждается исчезновением полосы поглощения с максимумом при 3458 см^{-1} , вызванной валентными колебаниями ОН-групп молекул воды (рис. 4а). На ИК-спектре появляется полоса поглощения с максимумом при 2778 см^{-1} , что можно объяснить поступлением из воздуха углекислого газа. Отмечено повышение относительной интенсивности дублета при 1435 и 1454 см^{-1} на 11 %, отвечающее валентным колебаниям группы CO_3^{2-} .

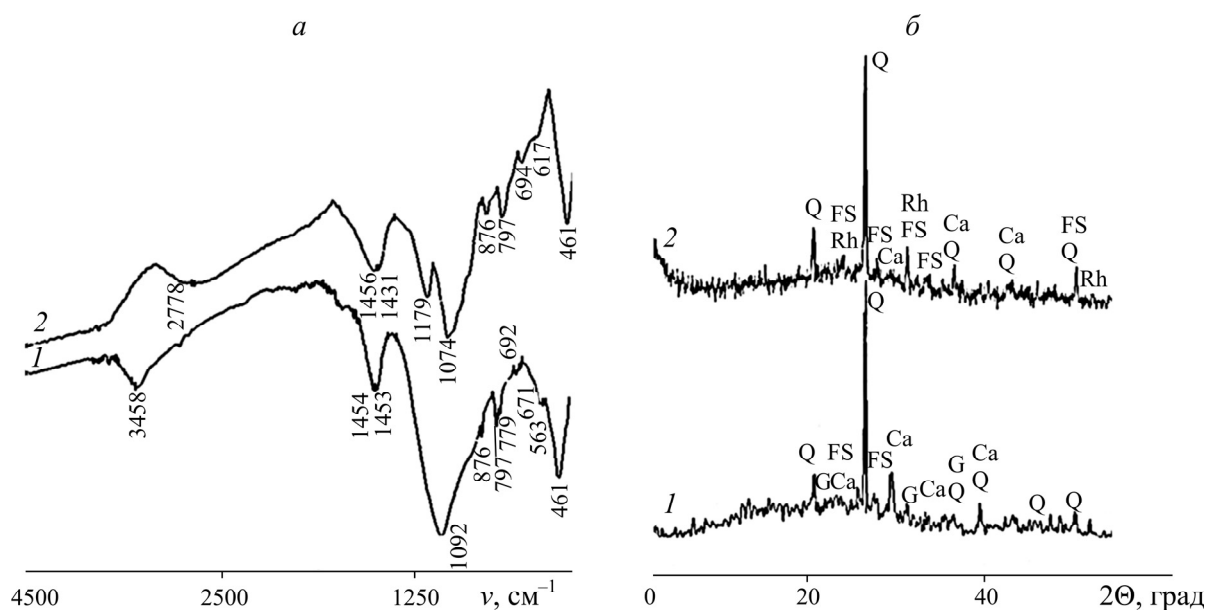


Рис. 4. ИК-спектры (а) и дифрактограммы интенсивности (б) образцов исходной (1) и механоактивированной (2) золы: G — гетит; Ca — кальцит; FS — полевошпат; Q — кварц; Rh — родохрит

Установлены процессы трансформации полосы поглощения валентных колебаний группы $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}(\text{Al})$ в области 1092 см^{-1} на два максимума при 1179 и 1074 см^{-1} со смещением на 22 см^{-1} в сторону меньшей длины волны, что вызвано замещением кремния на алюминий в кремнекислородных тетраэдрах с повышением дефектности структуры.

Упорядочение в расположении $\text{Si}(\text{Al})-\text{O}$ тетраэдров определяется появлением полосы поглощения в области 1179 см^{-1} с относительной интенсивностью 64% , увеличением интенсивности полосы поглощения при 461 см^{-1} на 16% . Аморфизация структуры вследствие механоактивации золы подтверждается исчезновением полос поглощения с максимумами при 563 , 671 см^{-1} . Выявлено, что механическая активация способствовала уменьшению истинной плотности золы от 1587 до 1469 кг/м^3 и увеличению ее удельной поверхности от 3130 до $6110\text{ м}^2/\text{кг}$. В связи с этим можно предположить возможность более эффективного заполнения частицами золы пор и микропустот в момент структурообразования укрепленных грунтов.

Известно, что механическая активация золы способствует диспергации и изменению ее фазового состава, однако в настоящем исследовании на дифрактограммах не наблюдалось характерного уширения рефлексов минералов золы, подвергшейся механоактивации в течение 60 с (рис. 4б, кривая 2).

Зарегистрированы незначительные уменьшения фона, характерные для рентгеноаморфных фаз, а также выявлены изменения интенсивности рефлексов фаз кристаллических включений (родохрозит), что свидетельствует о наличии процесса карбонизации. Результаты экспериментальных исследований доказывают, что происходит дегидратация и карбонизация золы, увеличение ее удельной поверхности и дефектности структуры с переходом в неравновесное состояние. Массовые доли компонентов в составе композиционных материалов определялись экспериментальным путем, оптимальное количество механически активированной золы и портландцемента составило 10 и $8\text{ мас. \%}$ соответственно. Массовая доля стабилизирующей добавки $1\text{ мас. \%}$.

В соответствии с требованиями ГОСТ 23558-94 важнейшими физико-механическими показателями полученных композиционных материалов являются марка по прочности M , которая определялась с учетом значений предела прочности на растяжение при изгибе $R_{\text{изг}}$, предела прочности при сжатии $R_{\text{сж}}$, а также марки по морозостойкости F . Образование структуры композиционного материала различной степени стабильности обусловлено степенью однородности, являющейся функцией различных параллельно протекающих процессов. Ведущая роль в структурообразовании композитов отводится начальному порядку упаковки минерального остова, характеру распределения пор и грунтовых микроагрегатов, а также площади контактов между грунтовыми частицами.

В табл. 2 приведены прочностные характеристики укрепленных портландцементом композиционных материалов, модифицированных механоактивированной золой уноса и стабилизирующей добавкой. Морозостойкие образцы на основе вскрышных пород Каменского карьера имеют марку по прочности $M 40$, образцы на основе пород Бaleyского и Тасеевского карьеров — $M 20$. Контрольные образцы, не содержащие механоактивированную золу и стабилизирующую добавку, укрепленные лишь портландцементом ($\omega = 8\text{ мас. \%}$), имели марку по прочности $M 10$, но оказались неморозостойкими.

Применение композиционных материалов, содержащих вскрышные породы Бaleyско-Тасеевского месторождения, модифицированных механически активированной золой уноса и стабилизирующей добавкой, позволит обеспечить устройство конструктивных слоев с высокими сроками обеспыливающего действия и решить проблему накопления крупнотоннажных отходов золотодобычи.

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические характеристики материалов пылеудерживающего действия

Карьер	Серия образцов	Водонасыщение				Марка прочности / морозостойкости
		капиллярное	полное	капиллярное	полное	
		$R_{сж}$, МПа		$R_{изг}$, МПа		
Тасеевский	1	2.00	1.50	0.40	0.40	М 20 / F 15
	2	1.80	1.80	0.25	0.30	
	3	2.50	2.00	0.40	0.40	
	4	2.00	2.00	0.40	0.35	
	5	2.00	2.00	0.40	0.40	
	6	2.00	2.00	0.40	0.40	
	Контрольный	1.00	—	0.20	0.10	М 10 / F 5
Каменский	1	3.75	3.70	0.70	0.68	М 40 / F 15
	2	3.70	3.70	0.70	0.70	
	3	4.25	4.00	0.80	0.79	
	4	4.00	3.80	0.80	0.80	
	5	4.20	4.20	0.85	0.80	
	6	4.20	4.00	0.80	0.80	
	Контрольный	1.50	—	0.30	0.20	М 10 / F 10
Балейский	1	2.50	2.00	0.40	0.30	М 20 / F 15
	2	2.00	2.00	0.35	0.35	
	3	2.00	1.80	0.30	0.40	
	4	2.20	2.00	0.40	0.40	
	5	2.00	1.80	0.40	0.40	
	6	2.00	2.00	0.40	0.40	
	Контрольный	1.00	1.00	0.20	0.15	М 10 / F 10

ВЫВОДЫ

Вскрышные породы могут быть эффективным исходным минеральным сырьем для получения композиционных материалов, применяемых при устройстве конструктивных слоев технологических дорог с оптимальными прочностными характеристиками, морозостойкостью и значительным обеспыливающим действием. Комплексный подход в структурировании и изменении строительных свойств минерального сырья предполагает использование неорганических вяжущих материалов, механоактивированной золы и стабилизатора на основе высокомолекулярных соединений.

Показана эффективность метода механической активации золы в течение 1 мин с дозой подведенной энергии $D = 0.72$ кДж/г при получении композиционных материалов. Механическая активация позволяет перевести золу в неравновесное состояние и способствует реализации процессов карбонизации и дегидратации. Установлено, что механическая активация приводит к замещению в кремнекислородных тетраэдрах кремния на алюминий.

Отмечено уменьшение на 7% истинной плотности механически активированной золы и повышение в 2 раза ее удельной поверхности. Механоактивация в течение 1 мин не позволяет обнаружить на дифрактограмме увеличение рентгеноаморфной фазы, отмечено только изменение интенсивности рефлексов кристаллических фаз. На дифрактограмме отсутствуют рефлексы гётита, наличие которого в составе золы может способствовать формированию трещин в образцах композиционных материалов и снижать их прочностные характеристики. При использовании механоактивированной золы наблюдается гидратация состава, что способствует формированию более плотной структуры укрепленного грунтового материала с марками по прочности М 20 – М 40.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худякова Л. И., Войлошников О. В., Кислов Е. В. Пути повышения рационального природопользования на примере Северо-Байкальского рудного района // Журн. СФУ. Серия: Техника и технологии. — 2011. — Т. 4. — № 2. — С. 155–161.
2. Брагин В. И., Макаров В. А., Усманова Н. Ф., Самородский П. Н., Лобастов Б. М., Вашлаев А. И. Минералогические исследования техногенного сырья хвостохранилища золотоперерабатывающей фабрики // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 163–171.
3. Комаров М. А., Алискеров В. А., Кусевич В. И., Заверткин В. Л. Горно-промышленные отходы — дополнительный источник минерального сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2007. — № 4. — С. 3–9.
4. Бугаева Г. Г., Когут А. В. Факторы экологического риска в зоне действия открытых горных работ // ГИАБ. — 2007. — Т. 9. — № 12. — С. 292–296.
5. Matinde E., Simate G. S., and Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: A review of recycling and re-use practices, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 2018, Vol. 118, Issue 8. — P. 825–844.
6. Brooks S. J., Escudero-Onate C., and Lillicrap A. D. An ecotoxicological assessment of mine tailings from three Norwegian mines, Chemosphere, 2019, Vol. 233. — P. 818–827.
7. Вишневский А. В. Использование отходов промышленного производства для обеспыливания технологических автомобильных дорог // Вестн. ЗабГУ. — 2017. — Т. 23. — № 11. — С. 12–18.
8. Шаров Н. А., Дудаев Р. Р., Кришук Д. И., Лискова М. Ю. Методы пылеподавления на угольных разрезах крайнего севера // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2019. — Т. 19. — № 2. — С. 184–200.
9. Driscoll K. E. and Maurer J. K. Cytokine and growth factor release by alveolar macrophages: potential biomarkers of pulmonary toxicity, Toxicol Pathol, 1991, Vol. 19, No. 4. — P. 398–405.
10. Голиков Р. А., Суржиков Д. В., Кислицына В. В., Штайгер В. А. Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения (обзор литературы) // Научное обозрение. Медицинские науки. — 2017. — № 5. — С. 20–31.
11. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах // Коллоидная химия. — М.: Наука, 1978. — 368 с.
12. Fan J., Wang D., and Qian D. Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2018, Vol. 10. — P. 791–797.
13. Бируля А. К. Новые конструкции оснований для дорожных покрытий // Строительство дорог. — 1989. — № 6. — С. 45–48.
14. Безрук В. М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. — М.: Транспорт, 1971. — 274 с.
15. Блеснина Н. А., Федоров Б. С. Глубинное закрепление грунта синтетическими смолами. — М.: Стройиздат, 1980. — 147 с.
16. Соколович В. Е. Химическое закрепление грунтов. — М.: Стройиздат, 1980. — 118 с.
17. Токин А. Н. Фундаменты из цементогрунта. — М.: Стройиздат, 1984. — 184 с.
18. Ржаницын Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. — М.: Стройиздат, 1986. — 264 с.
19. Correns C. W. The Experimental Chemical Weathering of Silicates. Clay Minerals Bull., Mineralogisch-Petrographisches Inst., 1961, No. 26. — P. 4.
20. Davidson D. T., Pitre G. L., Mateos M., and George K. P. Moisture strength and compaction characteristics of cement — treated soil mixtures, HRB Bull., 1962, No. 353. — P. 42–63.

21. **Dunn C. S. and Salem M. N.** Temperature and time effects on the shear strength of sand stabilized with cationic bitumen emulsion, Highway Res. Record, 1973, No. 442. — P. 113–124.
22. **Власова В. В., Власов А. И.** Особенности процесса механоактивации золошлаковых отходов теплоэлектростанций // ГИАБ. — 2009. — № S15. — С. 351–355.
23. **Калинкин А. М., Гуревич Б. И., Калинкина Е. В., Залкинд О. А.** О гидратации механоактивированной низкокальциевой золы ТЭС // Химия в интересах устойчивого развития. — 2018. — Т. 26. — № 4. — С. 395–402.
24. **Калинкин А. М., Гуревич Б. И., Калинкина Е. В., Семушин В. В., Залкинд О. А.** Синтез геополимеров на основе золы уноса с применением механоактивации // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2020. — № 17. — С. 241–245.
25. **Endzhievskaya I. G., Vasilovskaya N. G., Dubrovskaya O. G., Baranova G. P., and Chudaeva A. A.** The effect of mechanical activation on the stabilization of ash properties of Krasnoyarsk CHP, J. Siberian Federal University, Eng. Technol., 2018, Vol. 11, No. 7. — P. 842–855.

Поступила в редакцию 08/XI 2022

После доработки 20/XII 2022

Принята к публикации 19/I 2023