ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2-1):46-60
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 624.138.41 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_46

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПОЛИМЕРНОГО УКРЕПЛЕНИЯ РЫХЛЫХ ПОРОД ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Т.В. Шилова[1], С.В. Сердюков[1], А.Н. Дробчик[1], О.А. Иванова[1]

[1] Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Аннотация: Предложен способ укрепления рыхлых пород, включающий последовательную закачку компонентов двухкомпонентных полимерных смол с последующим вытеснением каждого раствора вглубь породы газом. Установлено, что последовательная закачка отдельных компонентов органоминеральных и полиуретановых составов обеспечивает снижение расхода полимера, двухкратное увеличение объема укрепленного песка по сравнению со стандартным способом ввода двухкомпонентных композиций. Формируется структура с упрочняющим каркасом из отвержденной смолы, что способствует повышению механической прочности полученных геоматериалов. Выявлено, что прочность на сжатие укрепленного песка в среднем более чем в два раза превышает значения, полученные при стандартной закачке. Способ наиболее эффективен при последовательном покомпонентном инъектировании составов малыми порциями с их вытеснением вглубь породы газом на каждом этапе. Также предложен метод повышения прочности рыхлых пород, укрепленных высокоэластичными полимерными смолами, который состоит в консолидации рыхлой породы двухкомпонентным высокоэластичным полиуретаном и дополнительной обработке малым объемом быстродействующей жесткой смолы с целью увеличения прочности полученного геоматериала. Установлено, что добавка 5 об.% однокомпонентной полиуретановой смолы повышает прочность армированного маловлажного песка в 1,3–1,5 раза относительно укрепления только высокоэластичным составом. В случае водонасыщенных песков эффективность метода увеличивается: при малой добавке жесткого полимера механическая прочность повышается более чем в два раз, по сравнению с породой, укрепленной только высокоэластичной смолой. Предложенные способы позволяют оптимизировать расход реагентов, повысить эффективность технологий физико-химического укрепления пород полимерными составами.

Ключевые слова: рыхлая порода, полимерные составы, физико-химическое воздействие, прочность, способ укрепления, песок, структура, геоматериал.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20055, https://rscf.ru/project/25-27-20055/ и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

Для цитирования: *Шилова Т. В., Сердюков С. В., Дробчик А. Н., Иванова О. А.* Развитие методов полимерного укрепления рыхлых пород для повышения эффективности эксплуатации горных выработок и инженерных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 46–60. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_46.

© Т.В. Шилова, С.В. Сердюков, А.Н. Дробчик, О.А. Иванова. 2026.

Development of polymer reinforcement methods for loose rocks to improve the efficiency of exploitation of mines and engineering structures

T.V. Shilova[1], S.V. Serdyukov[1], A.N. Drobchik[1], O.A. Ivanova[1]

[1] N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Abstract: The method for reinforcement of loose rocks, that includes sequential injection of components of two-component resins with subsequent displacement of each solution deep into the rock by gas, is proposed. It is established that sequential injection of individual components of silicate and polyurethane compositions provides a decrease in polymer consumption, a two-fold increase in the volume of reinforced sand, compared to the standard injection of two-component compositions. A structure with a reinforcing frame of cured polymer is formed, which helps to increase the mechanical strength of the formed geomaterial. It is revealed that the compressive strength of the reinforced sand is on average more than two times higher than the values obtained with standard injection. The method is most effective with sequential injection of components of compositions by small portions with their displacement deep into the rock by gas at each stage. The method for increasing the strength of loose rocks reinforced with highly elastic polymer resins, is proposed in the paper. The method consists in consolidation of loose rock with a two-component highly elastic polyurethane composition and additional treatment with a small volume of fast-acting rigid resin to increase the strength of the formed geomaterial. It has been established that the addition of 5 vol. % of a one-component polyurethane resin increases the strength of reinforced low-moisture sand by 1.3–1.5 times, relative to strengthening only with a highly elastic composition. For water-saturated sands, the efficiency of the method increases, with a small addition of a rigid polymer, the mechanical strength increases more than two times, compared to rock strengthened only with a highly elastic composition. The proposed methods allow optimizing the consumption of reagents, increasing the efficiency of technologies for physical and chemical reinforcement of rocks with polymer compositions.

Key words: loose rock, polymer compositions, physical chemical effect, strength, reinforcement method, sand, structure, geomaterial.

Acknowledgements: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 25-27-20055, https://rscf.ru/project/25-27-20055/, and financial support from the Government of the Novosibirsk Region.

For citation: Shilova T. V., Serdyukov S. V., Drobchik A. N., Ivanova O. A. Development of polymer reinforcement methods for loose rocks to improve the efficiency of exploitation of mines and engineering structures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1):46-60. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_46.

Введение

Методы химического укрепления горных пород полимерными составами широко используют при возведении, эксплуатации горных выработок, инженерных сооружений с 60-х годов прошлого века. Такие способы применяют с целью повышения прочностных свойств рыхлых, нарушенных горных пород, снижения их фильтрационных характеристик [1 — 3]. Двухкомпонентные составы на основе полиуретанов и полимерсиликатов (органоминеральные смолы) предназначены для увеличения механиче-

ской прочности пород [4, 5]. Значения пределов прочности на сдвиг, сжатие кварцевых песков, армированных полиуретановыми составами, могут увеличиваться в несколько раз по сравнению с образцами до физико-химического воздействия [6, 7]. Стандартная схема закачки двухкомпонентных композиций включает смешивание двух растворов (компонентов) друг с другом непосредственно перед вводом в массив, где они полимеризуются, вступая в химические реакции между собой и с пластовой водой. При этом после смешивания отдельных компонентов состава в смесителе инъекционного оборудования его вязкость увеличивается на один-два порядка за короткий промежуток времени [8 — 10]. Это приводит к уменьшению зоны распространения инъектируемой смолы в массиве и снижению пропитки укрепляемой породы. Также могут возникать проблемы с загрязнением оборудования из-за частичного схватывания полимера внутри инъекционной системы. В работе рассмотрен и протестирован в лабораторных условиях способ укрепления рыхлых пород, который включает последовательную закачку отдельных низковязких компонентов двухкомпонентных смол. При этом вследствие низкой вязкости растворов увеличивается зона пропитки породы, а по причине смешивания компонентов и начала полимеризации внутри массива исключаются проблемы с загрязнением инъекционного оборудования.

Возведение, эксплуатация горных выработок и инженерных сооружений зависят от свойств вмещающих пород. Несвязные песчаные, грубообломочные грунты относятся к наиболее проблемным из-за высокой проницаемости, гидравлической проводимости. Негативные последствия, возникающие вследствие разжижения, оседания грунтов, описаны в работах [11 — 13]. Для снижения их фильтрационных свойств широко используют высокоэластичные расширяющиеся полиуретановые смолы. По мере увеличения объема укрепляющего состава в процессе полимеризации происходит его «самоинъекция» и заполнение пустотного пространства массива. Низковязкие высокоэластичные композиции используют при газо- и гидроизоляции пород, возведении противофильтрационных завес в массиве [14, 15]. Проницаемость укрепленных рыхлых и нарушенных пород достигает значений, характерных для практически непроницаемых пород, и составляет примерно 0,001 мкм^2 [16, 17]. Вместе с тем главными недостатками являются низкая прочность геоматериалов, полученных при армировании высокоэластичными полимерами [18, 19]. В работе предложен комбинированный способ укрепления, который включает обработку высокоэластичным полиуретановым составом для снижения фильтрационных свойств рыхлых пород и добавление малого объема жесткого полимера для повышения механической прочности полученных геоматериалов. Приведены результаты лабораторных исследований по химическому закреплению пород разной степени водонасыщенности.

Материалы и методы

Материалы

Лабораторные исследования проводили с рыхлой породой, песком средней крупности и плотности. Предварительная обработка включала высушивание образцов до постоянной массы в сушильном шкафу, ситовой рассев, определение гранулометрического состава. Песчаную фракцию, состоящую из зерен 0,2 — 0,3 мм и соответствующую песку средней крупности, согласно ГОСТ 25100-2020, использовали для экспериментальных исследований. В лабораторных условиях определяли абсо-

лютную плотность, плотность скелета сухого грунта и по полученным значениям оценивали коэффициент пористости породы. Плотность частиц, скелета сухого грунта и расчетное значение коэффициента пористости в среднем составили 2,65 г/см^3; 1,6 г/см^3; 0,65 соответственно. В экспериментах использовали три типа образцов: маловлажный песок со степенью влажности (Sr), равной 0,1 — 0,2 д. е.; влажный песок (средней степени водонасыщения), Sr = 0,5 — 0,55 д.е.; водонасыщенный, Sr = 0,85 — 0,9 д.е., по ГОСТ 25100-2020. Высушенный песок искусственно увлажняли в лабораторных условиях, добавляя воду для достижения необходимой степени водонасыщения.

С целью повышения механической прочности и объема укрепленной рыхлой породы в экспериментах использовали двухкомпонентные органоминеральный (ОМ) и полиуретановый (ПУ) составы. Полимерный состав ОМ предназначен для упрочнения нарушенных зон горных пород, заполнения пустот и укрепления окружающего массива, снижения проницаемости. Он образуется при смешивании в объемном отношении 1:1 компонента А на основе жидкого стекла и компонента Б, являющегося смесью полиизоцианата и пластификатора [20]. Полиуретановый состав ПУ предназначен для стабилизации нарушенных пород, гидроизоляции, упрочнения бортов горных выработок. Смола образуется при однородном перемешивании компонентов А и Б в объемном соотношении 1:1. Компонент А представляет собой состав на основе полигликолей и катализатора отверждения полиуретанов, компонент Б — смесь диизоцианатов и полиизоцианатов. В процессе реакции полимеризации происходит вспенивание и значительное увеличение объема смеси. Технические характеристики составов ОМ и ПУ близки к полимерным композициям, сертифицированным для подземных горных работ (табл. 1).

С целью снижения фильтрационных свойств использовали двухкомпонентную высокоэластичную низковязкую смолу на основе полиуретанов (далее

Таблица 1

Свойства полимерных составов
Properties of polymer compositions

Показатель	**Состав ОМ**	**Состав ПУ**	**Состав БС**	**Состав МС**
Назначение	**Упрочнение нарушенных пород, снижение проницаемости пород**	**Стабилизация нарушенных пород, гидроизоляция горных выработок**	**Укрепление рыхлых, неустойчивых пород**	**Гидроизоляция, создание противофильтрационных завес**
Объемное соотношение компонентов А и Б	1:1	1:1	—	1:1
Плотность (компонентов А/Б), г/см^3	1,38/1,16 при 25 °С	1,083/1,235 при 25 °С	1,14 при 20 °С	1,01/1,21 при 23 °С
Вязкость (компонентов А/Б/смесь), мПа·с	137/131 при 25 °С	180 / 230 при 25 °С	800 — 1000 при 20 °С	115/40/80 при 23 °С
Время отверждения	210 — 240 с	90 — 150 с	90 — 180 с	около 3,5 ч
Прочность на одноосное сжатие, МПа	20 — 23	10 — 11	—	—

состав МС), которая предназначена для гидроизоляции выработок и пород, создания противофильтрационных завес в массиве, связывания и укрепления рыхлых пород. Состав МС в отвержденном виде является непроницаемым, эластичным материалом, нестабильным при значительных деформациях. Выполненные ранее исследования показали, что коэффициенты проницаемости песка, армированного полимерной смолой МС, составляют 10^{-3}—10^{-4} мкм^2, что на три и более порядка ниже значений, характерных для несвязного грунта до обработки [17].

С целью дополнительного повышения прочности использовали быстродействующую полиуретановую композицию (далее состав БС), которая предназначена для укрепления рыхлых пород при возведении подземных сооружений, заполнения микротрещин. Время полного отверждения составляет 90—180 с при температуре 25 °С. В отвержденном виде он представляет собой жесткую пену, способную выдерживать значительные динамические и статические нагрузки. Технические характеристики составов МС и БС показаны в табл. 1 [21].

Методы

Влияние двухкомпонентных полимерных составов ОМ и ПУ на прочность маловлажного песка средней крупности исследовали в лабораторных условиях. Для каждого типа полимера в экспериментах использовали три способа химического укрепления: 1 — стандартный метод, который включает приготовление и закачку готовой смеси компонентов А и Б смолы в образец

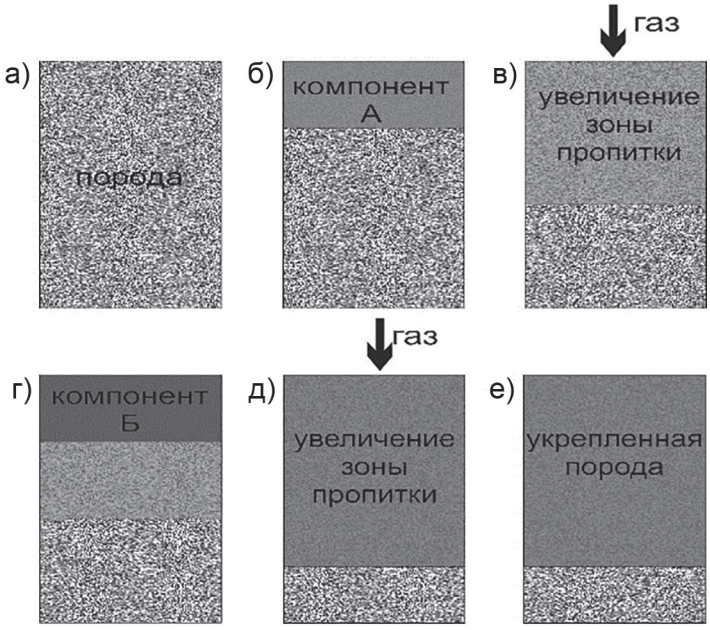
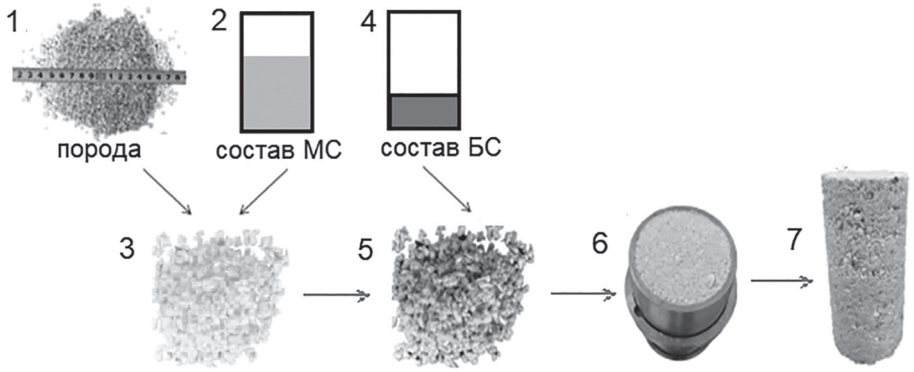


Рис. 1. Схема покомпонентной закачки двухкомпонентных полимерных композиций: образец породы (а); закачка компонента А состава (б); продавливание газом компонента А вглубь породы (в); закачка компонента Б состава (г); продавливание газом компонента Б вглубь породы (д); укрепленная порода (е)

Fig. 1. Scheme of component-by-component injection of two-component polymer compositions: rock sample (a); injection of component A of the composition (b); intrusion of component A into the rock by gas (v); injection of component B of the composition (g); intrusion of component B into the rock by gas (d); the reinforced rock (e)

породы; 2 — двухрастворная последовательная закачка отдельных компонентов А и Б смолы; 3 — двухрастворная последовательная закачка отдельных компонентов А и Б смолы малыми порциями. Методы укрепления 2, 3 в экспериментах реализовывали следующим образом: в образец песка закачивали компонент А полимерного состава, далее продували породу газом для распространения закаченного раствора и увеличения зоны пропитки, затем закачивали компонент Б и повторяли процедуру с обработкой газом для увеличения зоны пропитки (см. рис. 1). Отдельные компоненты закачивали как полным объемом (способ укрепления 2), так и малыми порциями с обработкой песка газом после каждой операции инъектирования (способ укрепления 3). В экспериментах объемное соотношение породы и жидкой полимерной композиции было 0,11 — 0,15, а в случае способа укрепления 3 объем малых порций на каждом этапе ввода был в 5 раз меньше. Давление закачки как отдельных компонентов, так и готовых смол достигало 0,5 — 1,5 МПа. Полученные смеси песка с химическими реагентами выдерживали до полного отверждения полимеров. Затем проводили деформационно-прочностные испытания укрепленной породы (геоматериала) методом одноосного сжатия в соответствии с ГОСТ 12248.2.-2020, оценивали объем консолидированного песка, исследовали структуру, пористость, содержание отвержденного полимера по изображениям, полученным методом электронно-сканирующей микроскопии (SEM) [22, 23].

Укрепление маловлажного, влажного и водонасыщенного песка полиуретановыми составами МС и БС выполняли двумя способами. Первый, однорастворный способ, заключался в приготовлении готовой смеси компонентов А и Б композиции МС, перемешивании с рыхлой породой, формировании образцов для тестов на трехосное сжатие, отборе проб для исследования структуры. Второй, двухрастворный способ, включал несколько этапов: подготовка образца породы, смешение с полимерным составом МС, добавление малого



1 – исходный образец породы; 2 – подготовка высокоэластичного состава МС;
3 – смешение породы с составом МС; 4 – подготовка малого объема быстродействующего состава БС;
5 – смешение с составом БС, получение укрепленной породы (геоматериала);
6 – заполнение формы с уплотнением на каждом этапе;
7 – образец геоматериала после отверждения полимеров

Рис. 2. Схема комбинированного укрепления, последовательного смешения рыхлой породы с полимерными составами МС и БС

Fig. 2. Scheme of combined strengthening, sequential mixing of loose rock with polymer compositions MC and BC

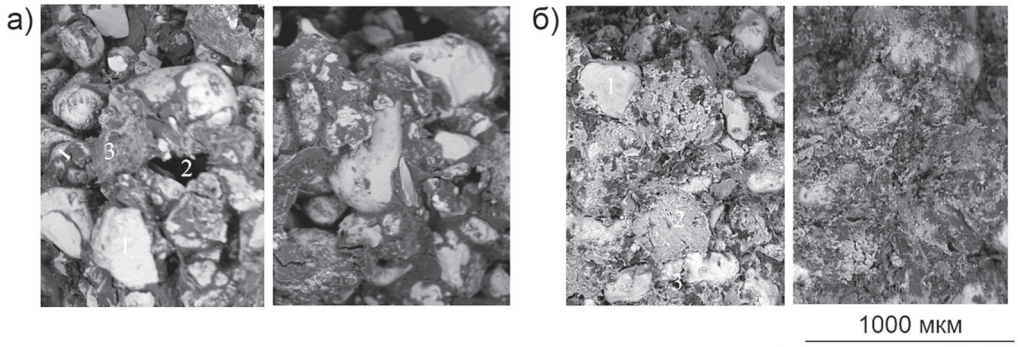
объема состава БС; заполнение цилиндрических форм смесью с уплотнением, изготовление образцов геоматериалов длиной 10 см и диаметром 5 см для проведения деформационно-прочностных испытаний в условиях трехосного сжатия; отбор проб для исследования структуры геоматериалов методом SEM (см. рис. 2). В обоих случаях образцы формировали при соотношениях объемов жидкого состава МС и укрепляемой рыхлой породы 0,1. При двухрастворном способе укрепления дополнительно добавляли 5 об. % состава БС. В большинстве практических приложений (строительство, возведение фундаментов) укрепление песчаных грунтов проводят на глубинах не более 3—5 м, где давление сжатия не превышает 100 кПа. Полученные образцы геоматериалов испытывали методом трехосного сжатия при боковом давлении 100 кПа и определяли деформационно-прочностные свойства, в соответствии с ГОСТ 12248.3-2020. Структуру геоматериалов исследовали методом SEM.

Анализ и обработку данных выполняли на автоматизированном анализаторе «Минерал С7» компании SIAMS [21].

Результаты и обсуждение

Укрепление пород составами ОМ и ПУ

Различия в распределении полимера в структуре геоматериалов, полученных при покомпонентной и стандартной закачке составов ОМ, ПУ, определены по результатам исследований методом SEM. В случае последовательной покомпонентной закачки компонентов смол с вытеснением газом вглубь породы отвержденный полимер локализуется в пустотном пространстве и на поверхности минеральных зерен в виде пленочных агрегатов, частично заполняя поры и связывая рыхлую породу (рис. 3). В случае стандартного способа укрепления песка готовыми составами ОМ, ПУ получаются образцы с более однородной структурой. В геоматериале отвержденный полимер практически полностью заполняет пустотное пространство. Остаточная пористость связана с небольшими закрытыми порами в массе отвержденного полимера и вблизи поверхности песчаных зерен (см. рис. 3). Результаты экспериментов показали, что метод физико-химического укрепления песка, включающий последовательную покомпонентную закачку двухкомпо-



1 – зерна песка; 2 – межзерновые пустоты; 3 – агрегаты отвержденного полимера

Рис. 3. Структура маловлажного песка, укрепленного способом покомпонентной закачки двухкомпонентного полимерного состава ОМ (а) и стандартным способом закачки готового состава ОМ (б)

Fig. 3. Structure of low-moisture sand strengthened by: component-by-component injection of a two-component polymer composition OM (a); standard injection of the full-prepared OM composition (b)

нентных составов (как малыми порциями, так и полного объема каждого компонента) с вытеснением растворов вглубь породы газом, обеспечивает армирование 40—45% и 28—35% объема образца при использовании составов ОМ и ПУ, соответственно. При стандартном способе укрепления закачкой готовых смол объем консолидированной породы снижается в 2,3—2,8 раза для обоих типов полимерных композиций. Получено, что расход органоминерального состава, отнесенный к объему консолидированного песка, при способе укрепления 1 в 1,2—1,3 раза выше по сравнению с покомпонентной закачкой отдельных компонентов (способы укрепления 2, 3). Основной причиной может быть быстрое увеличение вязкости готовых композиций за короткий период времени после смешивания отдельных компонентов и, в результате, уменьшение зоны их распространения в породе.

Эффективность предложенного способа закачки двухкомпонентных составов ОМ и ПУ оценивали по результатам прочностных тестов геоматериалов. Результаты лабораторных испытаний образцов песка, консолидированного полимерами ОМ, ПУ при стандартном способе укрепления 1 и последовательном инъектировании отдельных компонентов полным объемом и малыми порциями (способы 2, 3), приведены в табл. 2. Анализ полученных данных показывает, что последовательная покомпонентная закачка двухкомпонентных составов ОМ, ПУ с их вытеснением вглубь породы газом обеспечивает более высокую прочность геоматериалов, по сравнению с образцами, сформированными при стандартном способе обработки. Наиболее высокие значения достигаются в случае укрепления песка способом 3. Предел прочности на одноосное сжатие породы, армированной таким методом и полимерным составом ОМ, в среднем составляет 19,4 МПа, что в 1,5 раза и 2,5 раза выше значений, полученных при использовании способов 2 и 1, соответственно.

В случае двухкомпонентного полиуретанового состава ПУ также наиболее эффективен способ последовательной порционной закачки малых объемов отдельных компонентов с продувкой газом на каждом этапе. Значения предела прочности геоматериалов в среднем в 1,7 и 2,8 раза выше величин, полученных при укреплении песка способом 2 и способом 1, соответственно (см. табл. 2).

Результаты деформационно-прочностных испытаний геоматериалов показали, что наибольшая эффективность армирования песка достигается при последовательной закачке двухкомпонентных смол ОМ, ПУ отдельными малыми порциями каждого компонента с вытес-

Таблица 2

Прочностные свойства песка, укрепленного двухкомпонентными полимерными составами
Strength properties of sand reinforced with two-component polymer compositions

	Способ укрепления 1	**Способ укрепления 2**	**Способ укрепления 3**
Песок, армированный двухкомпонентным составом ОМ			
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	7,5; 7,1; 8,7	12; 9,8; 16,9	19,4; 17,4; 21,4
Песок, армированный двухкомпонентным составом ПУ			
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	1,9; 2,2; 2,3	3,0; 3,6; 3,8	7,3; 3,8; 6,5

нением газом вглубь породы. Предложенный способ обеспечивает более высокую прочность песка при более низком удельном объемном расходе полимеров по сравнению со стандартным методом укрепления. Причиной может быть формирование армирующего «каркаса» из тонких пленочных агрегатов отвержденного полимера в структуре геоматериала, который обеспечивает большую устойчивость к образованию трещин по сравнению с более монолитной, хрупкой средой со сплошным заполнением пор полимером.

Укрепление пород высокоэластичным составом МС с добавлением быстродействующего состава БС

Исследование структуры геоматериалов, полученных в результате укрепления песка разной степени водонасыщенности высокоэластичным полиуретановым составом, включало оценку распределения, количества отвержденного полимера в образцах. Как при однорастворном, так и при комбинированном двухрастворном способах обработки полученные геоматериалы приобретают «контактную» структуру, для которой характерно частичное заполнение пустотного пространства отвержденными полимерами, локализация связующего материала на контактах минеральных зерен. Анализ SEM-изображений консолидированного песка показал, что заполненность порового пространства отвержденными составами МС и БС преимущественно составляет 42—47% при начальном соотношении суммарного объема композиций и рыхлой породы 0,1, 0,15 (рис. 4).

Физико-механические свойства консолидированного песка существенно зависят от способа укрепления, водонасыщенности пород, внутренней структуры, формирующейся при смешении с полимерными смолами. По мере увели-

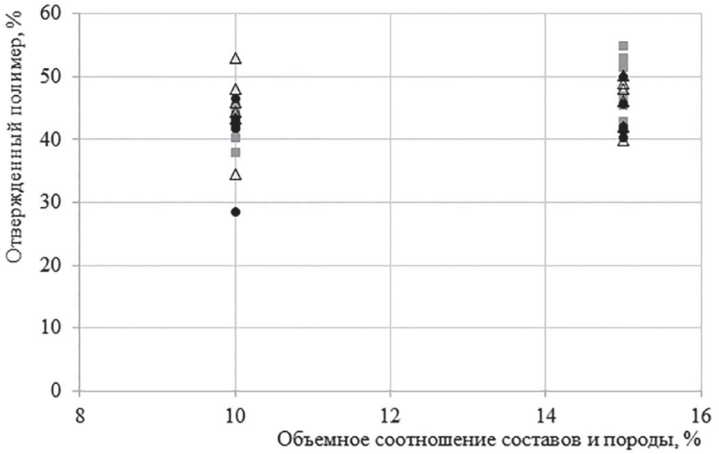


Рис. 4. Зависимость содержания отвержденного полимера в пустотном пространстве геоматериалов от общего объемного содержания жидких полиуретановых составов МС и БС в укрепленной породе согласно анализу SEM-изображений. Данные экспериментальных исследований образцов, полученных из: маловлажных песков — черные круги; влажных песков — белые треугольники; водонасыщенных песков — серые квадраты

Fig. 4. Dependence of the cured polymer content in the void space of geomaterials on the total volume content of liquid polyurethane compositions MC and BC in reinforced rock according to analysis of SEM images. Experimental data for samples formed from: low-moisture sands — black circles; medium-moisture sands — white triangles; water-saturated sands — gray squares

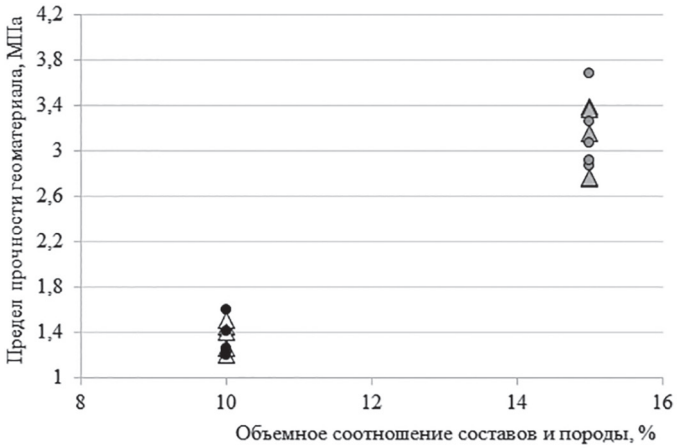


Рис. 5. Зависимость предела прочности геоматериалов при трехосном сжатии от общего начального объемного содержания жидких полимерных составов МС и БС: белые треугольники — влажный песок, укрепленный однорастворным способом высокоэластичным составом МС; серые треугольники — влажный песок, укрепленный двухрастворным способом смолами МС и БС; черные круги — водонасыщенный песок, укрепленный однорастворным способом составом МС; серые круги — водонасыщенный песок, укрепленный двухрастворным способом смолами МС и БС

Fig. 5. Dependence of the strength of geomaterials under triaxial compression on the total initial volume content of liquid polymer compositions MC and BC. White triangles — medium-moisture sand reinforced by a one-solution method with the highly elastic composition MC; gray triangles — medium-moisture sand reinforced by a two-solution method with compositions MC and BC; black circles — water-saturated sand reinforced by a one-solution method with the composition MC; gray circles — water-saturated sand reinforced by a two-solution method with compositions MC and BC

чения водонасыщенности пород, снижаются их прочностные характеристики. В случае однорастворного способа армирования с использованием только высокоэластичного полиуретанового состава МС предел прочности геоматериалов, полученных из маловлажного песка, в среднем составляет 1,5 МПа, что

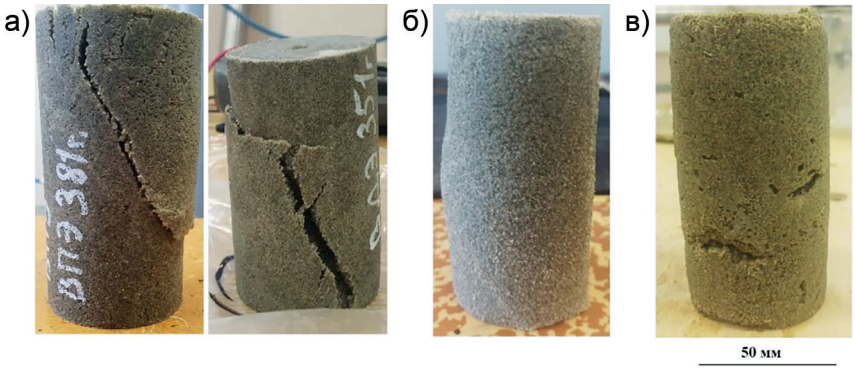


Рис. 6. Примеры разрушенных геоматериалов, сформированных из песков разной степени водонасыщенности, после испытаний на трехосное сжатие при суммарном объемном соотношении составов МС, БС к породе — 0,15: маловлажный песок (а); влажный песок (б); водонасыщенный песок (в)

Fig. 6. Destroyed after triaxial compression tests geomaterials, which formed from sands of various water saturation (low-moisture sand (a); medium-moisture sand (b); water-saturated sand (v)), tests with a total volume ratio of MS, BS compositions to rock of 0,15

в 1,2 — 1,3 раза выше, чем для образцов, сформированных из влажных и водонасыщенных песков. Дополнительная добавка 5 об. % быстродействующей полиуретановой композиции БС и применение двухрастворного способа обработки значительно повышают прочность консолидированных пород. Предел прочности геоматериалов, сформированных из маловлажного песка, составляет в среднем около 3 МПа. Близкие значения получены для образцов, представляющих собой укрепленные двухрастворным способом влажные и водонасыщенные пески (рис. 5). Примеры геоматериалов, сформированных из пород разной водонасыщенности, после деформационно-прочностных тестов на трехосное сжатие приведены на рис. 6.

По результатам экспериментов установлено, что добавление малого объема жесткого полимера и использование двухрастворного способа укрепления значительно повышает прочность маловлажного песка. Предел прочности увеличивается в 2 — 5 раз по сравнению с рыхлой породой до химического воздействия и в 1,3 — 1,5 раза относительно укрепления только высокоэластичным составом. В случае влажных и водонасыщенных пород эффективность комбинированного двухрастворного способа увеличивается: при добавлении жесткого полимера предел прочности геоматериалов повышается более чем в два раза по сравнению с породой, укрепленной только высокоэластичным составом.

Заключение

В работе рассмотрен способ физико-химического укрепления рыхлых пород, включающий последовательную закачку компонентов двухкомпонентных полимерных смол с последующим вытеснением каждого раствора вглубь породы сжатым газом. Приведена схема его реализации в лабораторных условиях. Метод протестирован на песке средней крупности, двухкомпонентных органоминеральной и полиуретановой смолах. Выполненные исследования показали, что последовательная закачка отдельных компонентов полимерных составов с последующим вытеснением каждого вглубь породы сжатым газом обеспечивает значительное снижение расхода полимера на единицу объема укрепляемого образца, более чем двухкратное увеличение объема закрепленной породы по сравнению со стандартным способом инъектирования двухкомпонентных составов. Формируется структура геоматериала с упрочняющим каркасом из отвержденного полимера, который соединяет минеральные зерна и частично заполняет пустотное пространство. Такая структура способствует повышению механической прочности укрепленной рыхлой породы. Установлено, что предел прочности на одноосное сжатие консолидированного песка в среднем более чем в два раза превышает значения, полученные при стандартном способе обработки двухкомпонентными полимерными составами. Наиболее эффективным методом укрепления оказалась последовательная покомпонентная закачка полимерных смол отдельными малыми порциями с их вытеснением вглубь образца газом на каждом этапе добавления. Экспериментальные исследования показали, что предложенный способ укрепления рыхлых пород перспективен, так как позволяет снизить расход полимерных составов, значительно повысить их прочностные свойства по сравнению со стандартным способом закачки.

С целью повышения прочности рыхлых пород, консолидированных высокоэластичными составами, в работе предложен комбинированный способ физико-химического воздействия. Он со-

стоит в укреплении несвязного грунта высокоэластичным полиуретановым составом и дополнительной добавке малого объема быстродействующей жесткой смолы для увеличения прочности геоматериала. Предложенный способ протестирован в лабораторных условиях на песке средней крупности разной степени водонасыщенности, двухкомпонентной высокоэластичной и однокомпонентной быстродействующей полиуретановых смолах. Экспериментальные исследования показали, что при объемном соотношении высокоэластичной смолы и маловлажного песка — 0,1 заполненность пустотного пространства отвержденным полимером составляет около 45%, геоматериал имеет «контактную» структуру. Добавление 5 об. % жесткого полимера (однокомпонентной полиуретановой смолы) значительно повышает прочность армированного маловлажного песка: предел прочности увеличивается в 2—5 раз по сравнению с образцами до химического воздействия и в 1,3—1,5 раза относительно укрепления только высокоэластичным составом. В случае влажных и водонасыщенных рыхлых пород эффективность комбинированного способа увеличивается, при малой добавке жесткого полимера механическая прочность повышается более чем в два раза по сравнению с породой, укрепленной только высокоэластичным составом.

Выполненные исследования показали, что предложенные способы перспективны, позволяют оптимизировать расход реагентов и повысить эффективность технологий физико-химического укрепления пород полимерными составами при возведении, эксплуатации горных выработок и инженерных сооружений.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы в качестве основы при проведении опытных работ в натурных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Faramarzi L., Rasti A., Abtahi S. M.* An experimental study of the effect of cement and chemical grouting on the improvement of the mechanical and hydraulic properties of alluvial formations // Construction and Building Materials. 2016, vol. 126, pp. 32—43. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.006.

2. *Dirgėlienė N., Kordušas V.* Stabilization of soil using polyurethane resin injection technology / International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 605—611. DOI: 10.1007/978-3-031-44603-0_62.

3. *Васильев В. В.* Полимерные композиции в горном деле. — М.: Наука, 1986. — 294 с.

4. *Sabri M. M., Shashkin K. G.* The mechanical properties of the expandable polyurethane resin based on its volumetric expansion nature // Magazine of Civil Engineering. 2020, vol. 6, no. 98, article 9811. DOI: 10.18720/MCE.98.11.

5. *Liu H., Wang F., Shi M., Tian W.* Mechanical behavior of polyurethane polymer materials under triaxial cyclic loading: a particle flow code approach // Journal of Wuhan University of Technology Materials Science Edition. 2018, vol. 33, no. 4, pp. 980—986. DOI: 10.1007/s11595-018-1922-9.

6. *Chen Q. S., Peng W., Tao G. L., Nimbalkar S.* Strength and deformation characteristics of calcareous sands improved by PFA // KSCE Journal of Civil Engineering. 2021, vol. 25, no. 1, pp. 60—69. DOI: 10.1007/s12205-020-0458-7.

7. *Feng W. Q., Bayat M., Bin L., Mousavi Z., Lin J. F., Li A. G.* Shear strength enhancement in soil using polyurethane foam adhesive and cement injections // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2024, vol. 10, no. 6, article 97. DOI: 10.1007/s40891-024-00603-w.

8. *Bodi J., Bodi Z., Scucka J., Martinec P.* Polyurethane grouting technologies // Polyurethane. 2012, vol. 1, pp. 307—336. DOI: 10.5772/35791.

9. *Wang J., Fan K., Du J., Xu J., Dong X., Li X., Ding Y.* Effect of organosilicon modified epoxy resin on slurry viscosity and mechanical properties of polyurethane grouting materials // Construction and Building Materials. 2023, vol. 387, article 131585. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131585.

10. *Cornely W.* Elastified silicate resins and polyurethane foam resins for the stabilization of strata-a comparison / Proceedings of the 6th International Seminary Reinforcement and Sealing of Rock and Construction at the Beginning of 21st Century, Ostrava, Czech Republic. 2001.

11. *Wu L., Wu Z., Weng L., Liu Y., Chu Z., Chen J.* Comparative analysis of polyacrylate latex modified cement grout for water blocking and rock reinforcement with six alternative materials // Construction and Building Materials. 2024, vol. 429, article 136377. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136377.

12. *Трацевская Е. Ю.* Геологические опасности при обосновании регламентов градостроительного развития // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — Т. 335. — № 9. — С. 73—83. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915.

13. *Toumpanou I. C., Pantazopoulos I. A., Markou I. N., Atmatzidis D. K.* Predicted and measured hydraulic conductivity of sand-sized crushed limestone // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2021, vol. 80, no. 2, pp. 1875—1890. DOI: 10.1007/s10064-020-02032-1.

14. *Silchenko V., Baev O., Kosichenko Y.* Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect // Magazine of Civil Engineering. 2022, vol. 111, no. 3, article 11109. DOI: 10.34910/MCE.111.9.

15. *Харченко И. Я., Панченко А. И., Ерофеев В. Т., Мирсаяпов И. Т., Хозин В. Г., Тараканов О. В., Завалишин Е. В.* Инъекционные технологии для устранения карстово-суффозионной опасности и просадочности грунтов в основании зданий и сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2024. — Т. 20. — № 6. — С. 593—612. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-6-593-612.

16. *Velez D., Alumbreros D., Carpintero D., Tsakas P., Tsaka E., Sakellariadis K., Papachatzaki Z. R.* Consolidation and waterproofing by injection of PU resins. Ilarion Dam-treatment on the spillway tunnel / Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World. London: CRC Press, 2023, p. 1048—1056. DOI: 10.1201/9781003348030-125.

17. *Шилова Т. В., Сердюк И. М., Сердюков С. В., Иванова О. А., Сердюков А. С.* Изменение проницаемости рыхлой породы при неполном насыщении высокоэластичной полимерной смолой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2024. — Т. 1. — С. 26—32. DOI: 10.15372/FTPRPI20240103.

18. *Ortiz R. C.* Mechanical behavior of grouted sands [master's dissertation]. Kentucky: University of Kentucky, 2015, 117 p.

19. *Miranda L., Caldeira L., Serra J. B., Gomes R. C.* Geotechnical characterization of a novel material obtained by injecting a closed cell expansive polyurethane resin into a sand mass // Transportation Geotechnics. 2023, vol. 42, article 101051. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.101051.

20. *Шилова Т. В., Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А.* Закрепление рыхлой породы инъекцией двухкомпонентной органоминеральной смолы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 5. — С. 178—187. DOI: 10.15372/FTPRPI20220517.

21. *Шилова Т. В., Сердюков С. В., Дробчик А. Н.* Экспериментальные исследования деформационно-прочностных свойств песчаного грунта при его укреплении полиуретановыми составами // Горные науки и технологии. — 2025. — Т. 10. — № 1. — С. 15—24. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-08-303.

22. *Razavifar M., Mukhametdinova A., Nikooee E., Burukhin A., Rezaei A., Cheremisin A., Riazi M.* Rock porous structure characterization: a critical assessment of various state-of-the-art techniques // Transport in Porous Media. 2021, vol. 136, no. 2, pp. 431—456. DOI: 10.1007/s11242-020-01518-6.

23. *Meng Q., Wang H., Wang W., Shen W., Zhu C.* Microscopic structure effect on the macroscopic property of geomaterials // Frontiers in Physics. 2022, vol. 10, article 1046888. DOI: 10.3389/fphy.2022.1046888. ГИАБ

REFERENCES

1. Faramarzi L., Rasti A., Abtahi S. M. An experimental study of the effect of cement and chemical grouting on the improvement of the mechanical and hydraulic properties of alluvial formations. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 126, pp. 32—43. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.006.

2. Dirgėlienė N., Kordušas V. Stabilization of soil using polyurethane resin injection technology. *International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 605 — 611. DOI: 10.1007/978-3-031-44603-0_62.

3. Vasil'ev V. V. *Polimernye kompozitsii v gornom dele* [Polymer compositions in mining], Moscow, Nauka, 1986, 294 p.

4. Sabri M. M., Shashkin K. G. The mechanical properties of the expandable polyurethane resin based on its volumetric expansion nature. *Magazine of Civil Engineering*. 2020, vol. 6, no. 98, article 9811. DOI: 10.18720/MCE.98.11.

5. Liu H., Wang F., Shi M., Tian W. Mechanical behavior of polyurethane polymer materials under triaxial cyclic loading: a particle flow code approach. *Journal of Wuhan University of Technology Materials Science Edition*. 2018, vol. 33, no. 4, pp. 980 — 986. DOI: 10.1007/s11595-018-1922-9.

6. Chen Q. S., Peng W., Tao G. L., Nimbalkar S. Strength and deformation characteristics of calcareous sands improved by PFA. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021, vol. 25, no. 1, pp. 60 — 69. DOI: 10.1007/s12205-020-0458-7.

7. Feng W. Q., Bayat M., Bin L., Mousavi Z., Lin J. F., Li A. G. Shear strength enhancement in soil using polyurethane foam adhesive and cement injections. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2024, vol. 10, no. 6, article 97. DOI: 10.1007/s40891-024-00603-w.

8. Bodi J., Bodi Z., Scucka J., Martinec P. Polyurethane grouting technologies. *Polyurethane*. 2012, vol. 1, pp. 307 — 336. DOI: 10.5772/35791.

9. Wang J., Fan K., Du J., Xu J., Dong X., Li X., Ding Y. Effect of organosilicon modified epoxy resin on slurry viscosity and mechanical properties of polyurethane grouting materials. *Construction and Building Materials*. 2023, vol. 387, article 131585. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131585.

10. Cornely W. Elastified silicate resins and polyurethane foam resins for the stabilization of strata-a comparison. *Proceedings of the 6th International Seminary Reinforcement and Sealing of Rock and Construction at the Beginning of 21st Century*, Ostrava, Czech Republic. 2001.

11. Wu L., Wu Z., Weng L., Liu Y., Chu Z., Chen J. Comparative analysis of polyacrylate latex modified cement grout for water blocking and rock reinforcement with six alternative materials. *Construction and Building Materials*. 2024, vol. 429, article 136377. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136377.

12. Tratsevskaya E. Yu. Geological hazards when justifying the regulations of urban development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024, vol. 335, no. 9, pp. 73 — 83. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915.

13. Toumpanou I. C., Pantazopoulos I. A., Markou I. N., Atmatzidis D. K. Predicted and measured hydraulic conductivity of sand-sized crushed limestone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021, vol. 80, no. 2, pp. 1875 — 1890. DOI: 10.1007/s10064-020-02032-1.

14. Silchenko V., Baev O., Kosichenko Y. Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect. *Magazine of Civil Engineering*. 2022, vol. 111, no. 3, article 11109. DOI: 10.34910/MCE.111.9.

15. Kharchenko I. Y., Panchenko A. I., Erofeev V. T., Mirsayapov I. T., Khozin V. G., Tarakanov O. V., Zavalishin E. V. Injection technologies for elimination of karst-suffosion hazard and soil subsidence in the foundation of buildings and structures. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. 2024, vol. 20, no. 6, pp. 593 — 612. [In Russ]. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-6-593-612.

16. Velez D., Alumbreros D., Carpintero D., Tsakas P., Tsaka E., Sakellariadis K., Papachatzaki Z. R. Consolidation and waterproofing by injection of PU resins. Ilarion Dam-treatment on the spillway tunnel. *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*. London: CRC Press, 2023, p. 1048 — 1056. DOI: 10.1201/9781003348030-125.

17. Shilova T. V., Serdyuk I. M., Serdyukov S. V., Ivanova O. A., & Serdyukov A. S. Change in permeability of loose rocks in partial impregnation with high-elastic polymer. *Journal of Mining Sciences*. 2024, vol. 1, pp. 26 — 32. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20240103.

18. Ortiz R. C. *Mechanical behavior of grouted sands* [master's dissertation]. Kentucky: University of Kentucky, 2015, 117 p.

19. Miranda L., Caldeira L., Serra J. B., Gomes R. C. Geotechnical characterization of a novel material obtained by injecting a closed cell expansive polyurethane resin into a sand mass. *Transportation Geotechnics*. 2023, vol. 42, article 101051. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.101051.

20. Shilova T. V., Serdyukov S. V., Rybalkin L. A. Soft Rock Reinforcement by Bicomponent Organomineral Resin Injection. *Journal of Mining Sciences*. 2022, no. 5, pp. 178 — 187. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220517.

21. Shilova T. V., Serdyukov S. V., Drobchik A. N. Experimental research of stress-strain properties of sandy soil when strengthened with polyurethane compounds. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025, vol. 10, no. 1, pp. 15 – 24. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-08-303.

22. Razavifar M., Mukhametdinova A., Nikooee E., Burukhin A., Rezaei A., Cheremisin A., Riazi M. Rock porous structure characterization: a critical assessment of various state-of-the-art techniques. *Transport in Porous Media*. 2021, vol. 136, no. 2, pp. 431 – 456. DOI: 10.1007/s11242-020-01518-6.

23. Meng Q., Wang H., Wang W., Shen W., Zhu C. Microscopic structure effect on the macroscopic property of geomaterials. *Frontiers in Physics*. 2022, vol. 10, article 1046888. DOI: 10.3389/fphy.2022.1046888.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шилова Татьяна Викторовна[1] – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: shilovatanya@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5056-9279,
Сердюков Сергей Владимирович[1] – д-р техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: ss3032@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1295-4122,
Дробчик Андрей Николаевич[1] – инженер-исследователь,
e-mail: valker.tiamant@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0002-7567-6497,
Иванова Оксана Александровна[1] – младший
научный сотрудник, e-mail: ksu_88@bk.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9334-4173,
[1] Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН.
Для контактов: Шилова Т.В., e-mail: shilovatanya@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

T.V. Shilova[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: shilovatanya@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5056-9279,
S.V. Serdyukov[1], Dr. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory, e-mail: ss3032@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1295-4122,
A.N. Drobchik[1], Research Engineer,
e-mail: valker.tiamant@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0002-7567-6497,
O.A. Ivanova[1], Junior Researcher,
e-mail: ksu_88@bk.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9334-4173,
[1] N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.
Corresponding author: T.V. Shilova, e-mail: shilovatanya@yandex.ru.

Получена редакцией 20.12.2025; получена после рецензии 13.01.2026; принята к печати 19.01.2026.
Received by the editors 20.12.2025; received after the review 13.01.2026; accepted for printing 19.01.2026.