



## СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-303>

УДК 624.131.4:66.094.35:678.6

**Экспериментальные исследования деформационно-прочностных свойств песчаного грунта при его укреплении полиуретановыми составами**Т. В. Шилова  , С. В. Сердюков  , А. Н. Дробчик 

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

 shilovatanya@yandex.ru**Аннотация**

При возведении и эксплуатации инженерных объектов, разработке месторождений твердых полезных ископаемых в ряде случаев необходимо улучшать свойства песчаных грунтов за счет их армирования полимерными составами. Анализ современных исследований показывает, что влияние расхода и способа обработки полиуретанами на приобретенные свойства рыхлых пород слабо изучено. В работе представлены результаты лабораторных исследований химического закрепления песчаного грунта полиуретановыми составами. Геоматериалы, обычно получаемые при армировании рыхлых пород высокоэластичными полимерами, имеют низкие прочностные свойства и стабильны лишь при незначительных нагрузках. Для повышения прочности предложена технология двухрастворной обработки песчаного грунта, включающая последовательное смешение породы с двухкомпонентным высокоэластичным медленно реагирующим составом и малым объемом быстротвердеющей однокомпонентной смолы. Цель работы – экспериментальное исследование зависимости деформационно-прочностных свойств песчаного грунта от способа смешения с полиуретановыми составами и объемного расхода полимера. Экспериментально протестированы стандартный однорастворный способ смешения образцов с высокоэластичной смолой в соотношении объемов с песком от 0,05 до 0,4 и двухрастворный, включающий дополнительную обработку быстротвердеющей однокомпонентной смолой в объеме 5 % от укрепляемого грунта. Влияние полиуретановых смол на свойства породы оценивали по результатам прочностных испытаний методом трехосного сжатия. Для определения содержания и распределения отвержденных полимеров в структуре рыхлой породы использовался метод электронно-сканирующей микроскопии. Установлено, что добавление быстротвердеющего полиуретанового состава в двухрастворном способе смешения приводит к формированию агрегатов отвержденного полимера, связывающих минеральные зерна без сплошного заполнения межзерновых пустот. Наличие таких агрегатов повышает прочностные характеристики песка до 5 раз, что в 1,3–3 раза больше, чем при стандартном однорастворном смешении с высокоэластичной смолой в объемном соотношении с укрепляемой породой до 0,3. Установлено, что в условиях трехосного сжатия геоматериал, полученный при двухрастворном способе смешения, выдерживает более значительные осевые деформации. В случае объемного соотношения смолы и породы более 0,3 прочность получаемого геоматериала не зависит от добавки быстротвердеющего состава. Практическая значимость полученных результатов состоит в повышении прочности песчаного грунта при его малообъемном укреплении высокоэластичными полиуретанами.

**Ключевые слова**

грунт, песок, свойства, прочность, укрепление, технология, обработка, полиуретан, смола, геоматериал, испытание, трехосное сжатие, разрушение, деформация

**Благодарности**

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121052500138-4, код (шифр) научной темы FWNZ-2021-0001). В работе использовано оборудование ЦКП ГГИ СО РАН.

**Для цитирования**

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;10(1):15–24. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-303>



## MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

**Experimental research of stress-strain properties of sandy soil when strengthened with polyurethane compounds**T. V. Shilova  , S. V. Serdyukov  , A. N. Drobchik 

N. A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

 [shilovatanya@yandex.ru](mailto:shilovatanya@yandex.ru)**Abstract**

In a number of cases during construction and operation of engineering facilities, development of mineral deposits it is necessary to improve the properties of sandy soils by strengthening them with polymer compounds. Analysis of current research shows that the effect of flow rate and method of treatment with polyurethanes on the acquired properties of loose rocks is poorly understood. The paper presents the results of laboratory research of chemical strengthening of sandy soil with polyurethane compounds. Geomaterials typically produced by strengthening loose rock with highly elastic polymers have low strength properties and are stable under only minor loads. To improve the strength, a two-binder sandy soil treatment process is proposed, which includes sequential mixing of the soil with a two-component highly elastic slow-reacting compound and a small volume of a fast-curing one-component resin. The aim of the work is to experimentally investigate the dependence of strain and strength properties of sandy soil on the method of mixing with polyurethane compounds and the polymer volume flow rate. A standard one-component method of mixing samples with highly elastic resin at the resin-to-sand volume ratio from 0.05 to 0.4 and a two-component method including additional treatment with fast-curing one-component resin in the volume of 5% of the strengthened soil were experimentally tested. The effect of polyurethane resins on rock properties was evaluated by triaxial compression strength tests. Electron scanning microscopy was used to determine the content and distribution of cured polymers in the loose rock structure. It was found that the addition of a fast-curing polyurethane compound in the two-component mixing method leads to the formation of aggregates of cured polymer, binding mineral grains without continuous filling of intergranular voids. The presence of such aggregates improves the strength characteristics of sand up to 5 times that is 1.3–3 times more than at the standard one-component mixing with highly elastic resin at a resin-to-rock to be strengthened volume ratio up to 0.3. It was found that under triaxial compression conditions, the geomaterial obtained by the two-component mixing method withstands higher axial stresses. In case the volume ratio of resin to rock is more than 0.3, the strength of the produced geomaterial does not depend on the addition of the fast-curing compound. The study findings practical significance consists in increasing the strength of a sandy soil due to its low-volume strengthening with highly elastic polyurethanes.

**Keywords**

soil, sand, properties, strength, strengthening, technology, treatment, polyurethane, resin, geomaterial, testing, triaxial compression, failure, strain

**Acknowledgments**

This research was conducted as part of a state-funded research project (State Registration No. 121052500138-4, Research Topic Code FWNZ-2021-0001). The equipment of the RAS SB MAC GGGM was used in the work.

**For citation**

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;10(1):15–24. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-303>

**Введение**

Проектирование, возведение и эксплуатация инженерных объектов, проходка горных выработок при разработке месторождений твердых полезных ископаемых зависят от свойств грунтов и вмещающих рыхлых пород. К наиболее проблемным относятся песчаные грунты с рыхлой структурой, высокой гидравлической проводимостью и плохой сортированностью. Указанные особенности способствуют интенсивному проявлению различных негативных физических процессов, например, разжижению, оседанию и эрозии грунта. В сложных инженерно-геологических условиях для улучшения свойств рых-

лых пород используют армирование полимерными композициями, химическими реагентами, взаимодействующими между собой и/или с подземными водами [1–3]. Такие методы широко применяют при строительстве тоннелей, освоении подземного пространства, проектировании оснований и фундаментов сооружений<sup>1</sup> [4]. Используют различные способы инъекционного укрепления, смешивания и тампо-

<sup>1</sup> СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83. URL: [https://lentsiz.ru/wp-content/uploads/2019/01/11\\_SP-22.133330.2016-Osnovaniya-zdaniy-i-sooruzhenij.pdf](https://lentsiz.ru/wp-content/uploads/2019/01/11_SP-22.133330.2016-Osnovaniya-zdaniy-i-sooruzhenij.pdf)



нажа цементами, полимерными смолами [5–7]. Для ряда технологий, например, закрепления грунтов растворами на основе цемента и силиката натрия, применяемых при строительстве, реконструкции и ремонте инженерных объектов, разработаны технические требования и нормативные документы, ГОСТ Р 59706–2022.

Преимуществом полимерных смол является способность диффундировать в горные породы и укреплять их в процессе полимеризации. Это повышает устойчивость рыхлых грунтов за счет связывания отдельных частиц в единую матрицу. Одним из видов таких составов являются полиуретановые смолы, которые используются не только для укрепления рыхлых пород, но и для снижения их проницаемости, предотвращения фильтрации в них флюидов [8–10]. В зависимости от решаемой геотехнической задачи применяют однокомпонентные или двухкомпонентные полиуретановые системы. В однокомпонентных системах полимеризация происходит при взаимодействии с пластовой водой. Как правило, такой состав интенсивно вспенивается, его объем увеличивается в несколько раз. Дополнительным преимуществом является относительно простое насосное оборудование для нагнетания в горные породы, а недостатками – ограниченное время хранения, сложность управления длительностью полимеризации, высокая чувствительность к водонасыщенности горных пород, атмосферной влаге.

В двухкомпонентных полиуретановых системах образование пенополиуретана происходит в результате взаимодействия изоцианата (компонент Б) и полиэфирной композиции (компонент А) – смеси полифункциональных гидроксилсодержащих полиолов со вспенивающим агентом и катализатором [11, 12]. Отверждение таких смол сильно зависит от равномерности перемешивания и распределения молекул реагентов в объеме готового состава. Неоднородность смеси ухудшает взаимодействие веществ, особенно для быстротвердеющих систем. Хорошо проникают в поры породы только смолы с низкой вязкостью и длительным временем отверждения. После диффузии и отверждения смолы частицы «склеиваются» полимером с небольшой остаточной пористостью [13, 14]. На практике применение быстротвердеющих составов для укрепления горных пород и грунтов осложняется ростом вязкости из-за малого времени реакции. Это ограничивает объем закачки состава, глубину и равномерность его проникновения в породу [15–17]. Применение двухкомпонентных медленно реагирующих высокоэластичных полиуретановых смол решает эту проблему. Они эффективны при возведении противофильтрационных завес, гидроизоляции грунтов, обеспечивают проницаемость песчаного грунта после закрепления, соответствующую значениям практически непроницаемых пород, около  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  мкм<sup>2</sup> [18, 19]. В то же время геоматериалы, полученные при армировании пород высокоэластичными полиуретанами, имеют низкую механическую прочность и стабильны лишь при незначительных нагрузках [20, 21].

Тестовые лабораторные исследования по закреплению пород с последующим определением физико-механических, фильтрационных свойств образующихся геоматериалов позволяют прогнозировать результаты полевых работ<sup>2</sup> [22, 23]. Анализ известных исследований показывает слабую изученность влияния расхода и способа обработки полимерами на приобретенные прочностные свойства рыхлых и трещиноватых пород. В настоящей работе рассматривается двухрастворный способ повышения механической прочности получаемых геоматериалов, включающий последовательное смешение образцов песчаного грунта с двухкомпонентным высокоэластичным полиуретановым составом и малым объемом быстродействующей однокомпонентной смолы. Цель работы – по результатам лабораторных исследований определить особенности изменения прочностных свойств песчаного грунта в зависимости от способа смешения и объемного расхода полимера. Поставлены следующие задачи: исследовать структуру, деформационно-прочностные свойства геоматериалов, полученных при однорастворном и двухрастворном способах смешения песчаного грунта с полиуретановыми составами и их разных объемных расходах; определить связь между внутренней структурой и прочностными характеристиками геоматериалов, влияние добавления быстродействующего полиуретанового состава на механическую прочность укрепляемого песка.

## Материалы и методы

### Материалы

В экспериментах использовали двухкомпонентную медленно реагирующую высокоэластичную полиуретановую смолу (далее – состав МС), которая предназначена для консолидации и гидроизоляции грунтов, создания противофильтрационных завес. Состав МС образуется при смешивании до однородной консистенции компонентов А и Б в объемном соотношении 1:1. Компонент А представляет собой смесь касторового масла (40–41 об.%), феноксипропанола (20 об.%) и полипропиленгликоля низкого молекулярного веса (40–41 об.%). Компонент Б является смесью метилendifенилдиизоцианата (66–67 об.%), полипропиленгликоля (10 об.%), пропиленкарбоната (21–23 об.%). После смешивания компонентов А и Б вязкость состава МС составляет около 95–120 МПа·с и остается низкой на протяжении длительного времени (десятки минут). Это способствует проникновению готового состава в тонкие трещины, мелкопористые грунты, увеличивает охват породы воздействием, снижает ее фильтрационные свойства. Время полного отверждения составляет около 3 ч. При этом происходит вспенивание и увеличение объема смеси. В отвержденном виде состав МС представляет собой непроницаемый, эластичный материал, стабильный при небольших деформациях. Технические характеристики приведены в табл. 1.

<sup>2</sup> Ortiz R.C. Mechanical behavior of grouted sands. [Master's dissertation]. Kentucky: University of Kentucky; 2015. 117 p.



Таблица 1

## Свойства двухкомпонентных полиуретановых составов

Показатель	Состав МС	Состав БС
Назначение	Гидроизоляция, создание противо-фильтрационных завес и пр.	Укрепление рыхлых, неустойчивых пород и пр.
Объемное соотношение компонентов А и Б	1:1	–
Объемное соотношение смолы : вода	–	1:1–9:1
Плотность (компоненты А/Б), г/см <sup>3</sup>	1,01/1,21 при 23 °С	1614 при 20 °С
Вязкость (компоненты А/Б/смесь), МПа·с	115/40/80 при 23 °С	800–1000 при 20 °С
Время отверждения, с	Около 10800	90–180
Поверхностное натяжение при 23 °С, мН/м	35,7	–

Для повышения прочности породы в экспериментах была использована однокомпонентная быстродействующая полиуретановая смола (далее – состав БС), предназначенная для укрепления рыхлых, неустойчивых пород при строительстве подземных сооружений, заполнения микротрещин в бетонных и каменных конструкциях. Реакция полимеризации происходит при смешивании полиуретанового состава с водой до однородной консистенции в соотношении от 1:1 до 9:1 (смола : вода). В экспериментах использовали соотношение 5:1. Время отверждения составляет 90–180 с при температуре 25 °С. При этом происходит вспенивание за счет выделения углекислого газа, являющегося продуктом взаимодействия изоцианата и воды. В отвержденном виде состав БС представляет собой мелкопористую пену, способную выдерживать значительные динамические и статические нагрузки. Высокая вязкость состава – 800–1000 МПа·с при 20 °С, уменьшает зону пропитки пород, особенно в низкопроницаемых грунтах, породах, содержащих тонкие трещины, и пр. Технические характеристики смолы БС приведены в табл. 1.

Лабораторные исследования проводили с образцами песка, отобранного на карьере в Новосибирском районе Новосибирской области. Для экспериментов использовали мелкозернистый песок, на 90 % по массе состоящий из фракции частиц размером 0,2–0,25 мм. Породу предварительно высушивали до постоянной массы, определяли плотность минеральных частиц и насыпную плотность, оценивали коэффициент пористости по полученным значениям. Плотность частиц и скелета сухого грунта в среднем равны 2,64 и 166 г/см<sup>3</sup> соответственно, а расчетный коэффициент пористости – 0,65.

**Методы**

Влияние полимерных смол на свойства мелкозернистого песка исследовали в лабораторных условиях. Проведение экспериментов включало несколько этапов: подготовка образцов породы, смешанной с полимерами (геоматериал); проведение деформационно-прочностных испытаний в условиях трехосного сжатия; анализ микроструктуры и пористости методом электронной сканирующей микроскопии.

В экспериментах использовали два способа смешения песка с полиуретановыми смолами: однорастворный с готовой смесью компонентов А и Б состава МС; двухрастворный – последовательно с готовыми составами МС и БС. В случае однорастворного способа приготовленную смесь компонентов А и Б состава МС добавляли в песок и перемешивали до образования однородной массы. При двухрастворном песок последовательно смешивали с готовыми составами МС и БС. Образцы (рис. 1) формировали при соотношениях объемов жидкой смолы и укрепляемой рыхлой породы 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 (табл. 2). Полученную смесь песка с реагентами помещали в стальную цилиндрическую форму диаметром 50 мм и высотой 120 мм, уплотняли и оставляли на 24 ч до полного отверждения полимеров. Затем образцы извлекали и обрабатывали на камнерезном станке, уменьшая высоту до 100 мм.

Таблица 2

## Содержание полиуретановых смол в образцах геоматериалов

Номер образца	Способ смешения	Соотношение объемов состава МС и укрепляемой породы	Соотношение объемов состава БС и укрепляемой породы
1.1	Однорастворный	0,4	0
1.2	То же	0,3	0
1.3	То же	0,2	0
1.4	То же	0,1	0
1.5	То же	0,05	0
2.1	Двухрастворный	0,4	0,05
2.2	То же	0,3	0,05
2.3	То же	0,2	0,05
2.4	То же	0,1	0,05
2.5	То же	0,05	0,05



Рис. 1. Образцы геоматериалов для испытаний на трехосное сжатие

Полученные образцы геоматериалов испытывали методом трехосного сжатия на приборе ГТ 1.3.5<sup>3</sup>. Прочностные и деформационные характеристики определяли в соответствии с ГОСТ 12248.3–2020. Эксперименты выполняли при боковом давлении 100 кПа, скорости осевой деформации 0,5 мм/мин с ограничением вертикальной нагрузки в 5000 кПа. По результатам тестов установлены особенности деформирования образцов, предельные нагрузки, определены значения модуля деформации по методике, рекомендованной ГОСТ 12248.3–2020. Регистрация и обработка данных производились с использованием специализированной программы Geotek Studio компании ООО НПП «Геотек».

Полученные геоматериалы были исследованы методом электронной сканирующей микроскопии (SEM). По полученным SEM-изображениям идентифицированы минеральные зерна, агрегаты отвержденного полимера, получены количественные оценки их содержания в объеме укрепленной породы [24]. Установлены пространственное распределение неоднородностей и пустот, структурные особенности геоматериалов в соответствии с классификацией работы [25]. Пробы для изучения отбирали вдоль оси, из верхней, средней, нижней части цилиндрических образцов. Анализ и обработка данных выполнены на автоматизированном анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел «Минерал С7» компании SIAMS.

### Результаты и обсуждение

Особенности распределения отвержденных полиуретановых смол в образцах мелкозернистого песка определяли по SEM-изображениям. В геоматериалах, полученных при одностороннем способе смешения породы со смолой, отвержденный состав МС занимает значительную часть пустотного пространства. Остаточная пористость связана с пустотами, локали-

зованными вблизи поверхности минеральных зерен (рис. 2). По мере увеличения соотношения объемов смолы и породы с 0,05 до 0,4 заполненность пустотного пространства отвержденным составом МС повышается с 43 до 75 %, или в 1,7 раза. Линейная аппроксимация зависимости между указанными параметрами имеет коэффициент детерминации  $R^2 = 0,83$  (рис. 3).

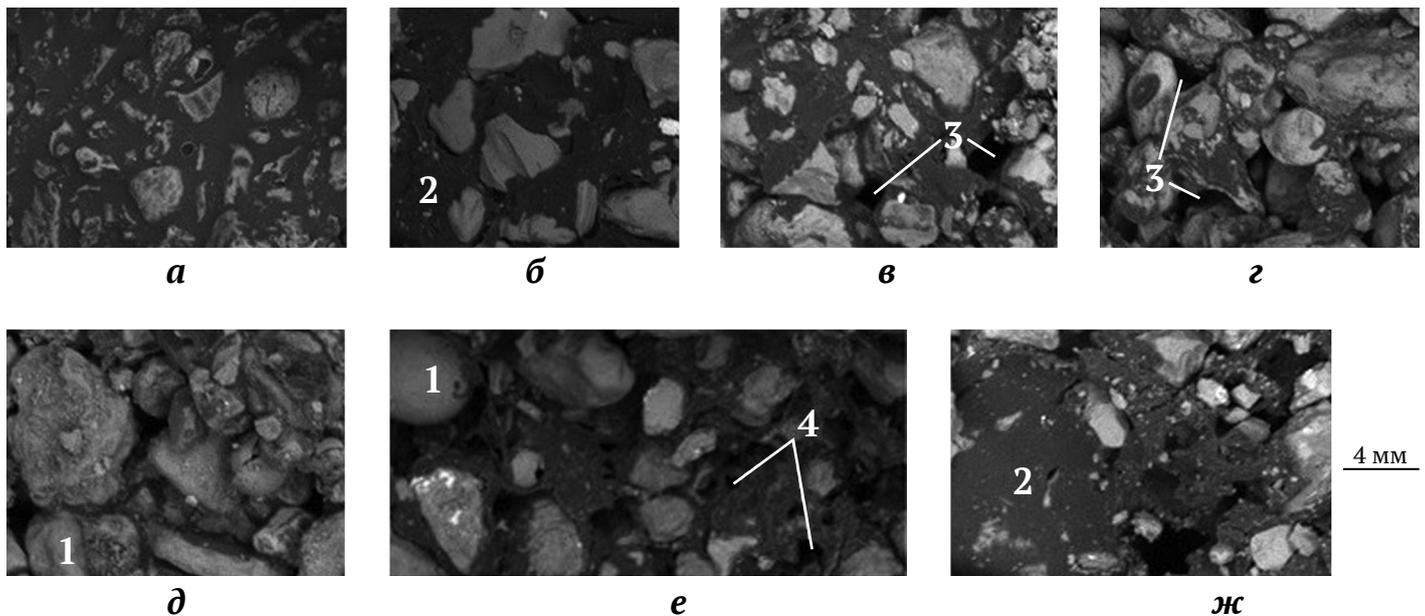
В образцах, полученных при двухстороннем способе смешения песка с полиуретановыми составами, агрегаты отвержденных смол также занимают большую часть порового пространства. Быстротвердеющий состав БС локализуется вблизи поверхности минеральных зерен, связывая их и формируя агрегаты с изолированными порами в структуре полимера. Кроме того, остаточная пустотность обусловлена порами, расположенными в межзерновом пространстве (см. рис. 2). Исследования проб из средней и нижней части образцов показали, что по мере увеличения отношения объемов смол МС, БС и укрепляемого песка с 0,1 до 0,45 заполненность пустотного пространства отвержденными полимерами увеличивается с 40 до 72 %, или в 1,8 раза (см. рис. 2, 3). Образование агрегатов состава БС с замкнутыми порами вблизи поверхности минеральных зерен может препятствовать проникновению низковязкой смолы МС в незаполненные пустоты. Структура получаемого геоматериала зависит от объемного соотношения смол и песчаного грунта. Если это соотношение больше 0,3, заполненность пустотного пространства отвержденными составами составляет более 60 %, а геоматериал имеет базальную структуру, характеризующуюся равномерным распределением минеральных частиц в массе связующего материала. По мере уменьшения объемного соотношения смол и породы до 0,05–0,15 заполненность пустотного пространства отвержденными составами снижается до 40–50 %, а образующийся геоматериал приобретает «контактную» структуру, в которой связующий материал локализуется в основном на контактах зерен (см. рис. 2)<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Прибор трехосного сжатия автоматизированный ГТ 1.3.5. URL: <https://npp-geotek.com/upload/iblock/3d5/3d5b19682b34abee1c6ee34f00e5d9d.pdf> [Дата доступа: май 2024].

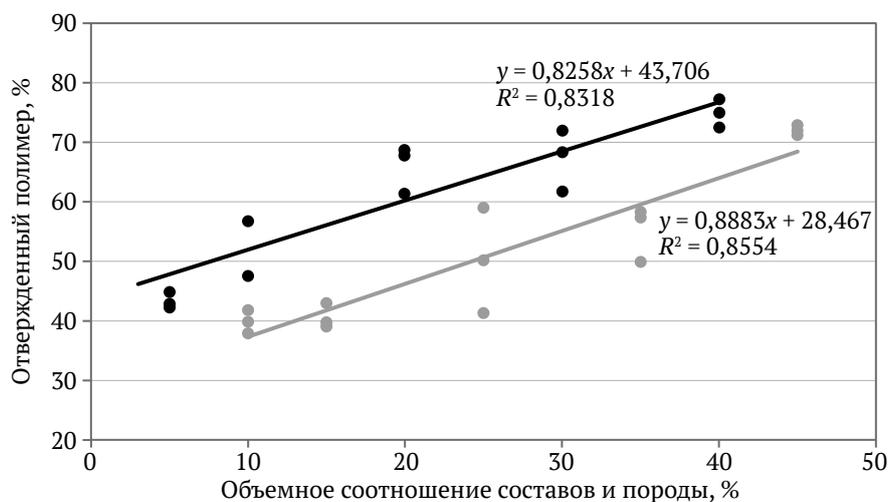
<sup>4</sup> Ortiz R.C. Mechanical behavior of grouted sands. [Master's dissertation]. Kentucky: University of Kentucky; 2015. 117 p.

Деформационно-прочностные свойства полученных геоматериалов зависят от внутренней структуры, формирующейся в результате смешения с полиуретановыми смолами. Механические свойства песка, закрепленного полиуретановыми составами, определяли по диаграммам «осевое напряжение  $\sigma_v$  – относительная осевая деформация  $\varepsilon_1$ » при деформировании образцов со скоростью 0,5 мм/мин до значения относительной деформации  $\varepsilon_1 = 0,15$  (15 %). Установлено,

что в случае однорастворного способа смешения с объемными соотношениями смолы и породы 0,05, 0,1, 0,2 и 0,3 образующийся геоматериал разрушается с выраженным пределом прочности (максимум напряжения), а при 0,4 ведет себя как эластомер. Причем предел его текучести в исследованном диапазоне относительных деформаций не наблюдается (ГОСТ 4651–2014). Значение максимума осевого напряжения зависит от содержания в породе высокоэластичного состава МС



**Рис. 2.** Фрагменты SEM-изображений геоматериалов, полученных при смешении песка с полиуретановыми смолами. Однорастворный способ смешения с высокоэластичным составом МС при объемном соотношении смолы и породы: а – 0,4; б – 0,3; в – 0,2; г – 0,1; д – 0,05. Двухрастворный способ смешения с составами МС и БС при соотношении объемов состава БС и укрепляемой породы 0,05, состава МС и породы: е – 0,2; ж – 0,3. Обозначения: 1 – минеральные зерна; 2 – отвержденный полимер; 3 – межзерновые пустоты; 4 – замкнутые поры в структуре отвержденного полимера

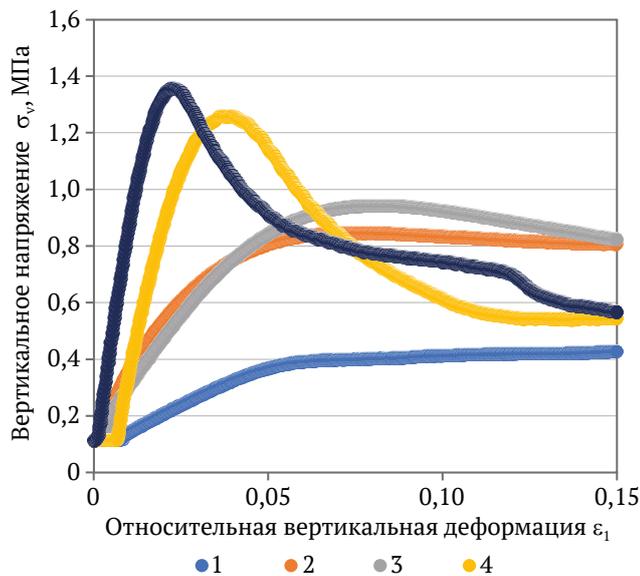


**Рис. 3.** Зависимость содержания отвержденного полимера в пустотном объеме от соотношения объемов полиуретановых смол в укрепляемой породе (песке) по данным анализа SEM-изображений. Черные и серые круги – данные экспериментальных исследований образцов, полученных при однорастворном способе смешения песка с составом МС и при двухрастворном способе смешения песка с составами МС, БС соответственно. Черная и серая линии – линейные аппроксимации экспериментальных данных

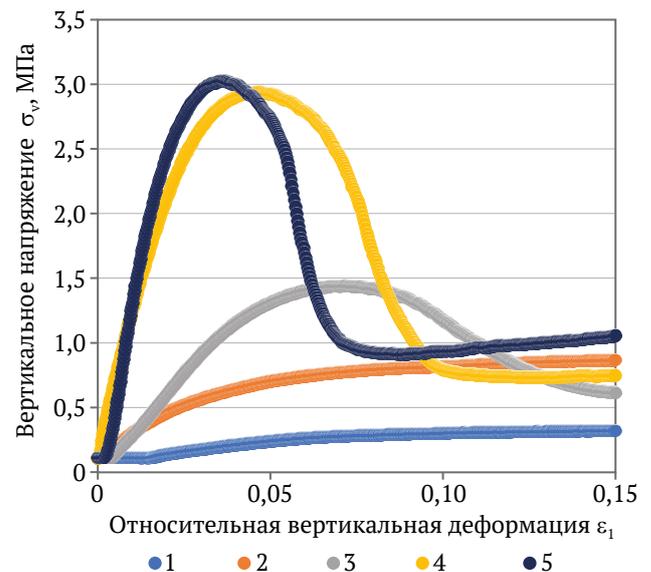
и увеличивается более чем в 2,5 раза при уменьшении количества смолы в 8 раз. При  $\varepsilon_1 = 0,15$  максимальная прочность достигнута при объемном соотношении смолы и породы 0,2, 0,3, минимальная – при 0,4. С ростом количества смолы увеличивается значение деформации, соответствующее пределу прочности геоматериала (рис. 4). Для объемных соотношений смолы и породы 0,05, 0,1, 0,2 предел прочности геоматериала наблюдается при  $\varepsilon_1 \approx 0,025, 0,04$  и 0,08 соответственно (см. рис. 4).

В случае двухрастворного способа смешения песка с полиуретановыми смолами с добавлением 5 об.% быстросхватывающейся смолы БС выраженный предел

прочности геоматериалов наблюдается, когда соотношение суммарного объема составов МС, БС и объема укрепляемой рыхлой породы составляет 0,1, 0,15, 0,25. Когда объемное соотношение достигает 0,35, 0,45, геоматериал ведет себя подобно эластомерам (рис. 5). При уменьшении количества составов в 4,5 раза предел прочности увеличивается более чем в 9 раз. Для  $\varepsilon_1 = 0,15$  прочность максимальна при объемном соотношении смолы МС и породы, равном 0,05, минимальна – при 0,4. Для объемных соотношений 0,1, 0,15 и 0,25 суммы составов МС, БС и укрепляемой породы предел прочности геоматериала наблюдается при  $\varepsilon_1 \approx 0,03, 0,05$  и 0,07 соответственно (см. рис. 5, 6).



**Рис. 4.** Диаграммы «осевое напряжение – относительная осевая деформация» образцов геоматериалов, полученных при однорастворном способе смешения песка с высокоэластичной полиуретановой смолой МС. Объемное соотношение смолы и породы (и содержание отвержденного полимера, определенное по зависимостям, см. рис. 3): 1 – 0,4 (77 %); 2 – 0,3 (68 %); 3 – 0,2 (60 %); 4 – 0,1 (52 %); 5 – 0,05 (48 %)



**Рис. 5.** Диаграммы «осевое напряжение – относительная осевая деформация» образцов геоматериалов, полученных при двухрастворном способе смешения песка с высокоэластичной и быстросхватывающейся полиуретановыми смолами МС и БС. Объемное соотношение смол и породы (и содержание отвержденного полимера, определенное по зависимостям, см. рис. 3): 1 – 0,45 (68 %); 2 – 0,35 (60 %); 3 – 0,25 (51 %); 4 – 0,15 (42 %); 5 – 0,05 (37 %)



**а**



**б**

**Рис. 6.** Примеры разрушенных и деформированных геоматериалов после испытаний на трехосное сжатие при объемном соотношении составов МС, БС и породы: **а** – 0,35, 0,45; **б** – 0,1, 0,15, 0,25



Таблица 3

**Модуль деформации геоматериалов  
в зависимости от соотношения объемов составов  
и укрепляемой породы**

Номер образца	Соотношение объемов состава МС и укрепляемой породы	Соотношение объемов состава МС и укрепляемой породы	Модуль деформации, МПа
1.1	0,4	0	5,6
1.2	0,3	0	18,3
1.3	0,2	0	16,1
1.4	0,1	0	53,3
1.5	0,05	0	70,6
2.1	0,4	0,05	5,2
2.2	0,3	0,05	14,1
2.3	0,2	0,05	29,9
2.4	0,1	0,05	101,5
2.5	0,05	0,05	132,7

По результатам деформационно-прочностных испытаний образцов были определены значения модуля деформации геоматериалов. Использовалась методика, рекомендованная ГОСТ 12248.3–2020. Установлено, что в случае однорастворного способа смешения восьмикратное увеличение количества смолы МС снижает модуль деформации получаемых геоматериалов более чем в 10 раз. Наибольший прирост модуля деформации имеет место при снижении объемного соотношения смол и породы с 0,2 до 0,1.

Двухрастворный способ смешения с добавлением быстродействующего полиуретанового состава БС приводит к повышению модуля деформации геоматериала в случае, когда объемное соотношение смолы МС и породы равно 0,05, 0,1, 0,2. Если значение этого соотношения выше, то добавление состава БС влияет слабо (табл. 3).

Сравнивая результаты механических испытаний песка до и после укрепления полиуретановыми смолами, можно отметить, что использование высокоэластичной смолы в объемном соотношении с породой не более 0,3 повышает прочность последней в 1,3–2,3 раза. Добавка 5 об.% быстродействующей смолы БС приводит к дополнительному увеличению прочности еще в 1,6–2,2 раза. В случае объемных соотношений высокоэластичной смолы и породы более 0,3 характер деформирования геоматериала значительно меняется. По сравнению с рыхлой породой, не обработанной полимерами, прочность снижается в 1,3–1,7 раза и практически не зависит от добавления быстродействующей смолы. Такой геоматериал проявляет свойства композитного эластомера. Его образцы деформируются без видимого разрушения, а после снятия нагрузки восстанавливаются почти до первоначального размера (см. рис. 6)

Экспериментальные исследования показали, что в условиях трехосного сжатия геоматериалы, полученные двухрастворным способом смешения песка

с полиуретановыми составами МС и БС, выдерживают более высокие механические нагрузки, чем при однорастворном способе смешения только с одной высокоэластичной смолой. Наиболее выражено это при малом объемном соотношении смол и укрепляемой рыхлой породы (0,05, 0,1). При объемных соотношениях 0,3, 0,4 влияние добавки быстродействующей смолы незначительно влияет на значение модуля деформации образующегося геоматериала.

**Заключение**

Способ смешения песка с полиуретановыми составами, соотношение объемов смол и укрепляемой рыхлой породы существенно влияют на распределение минеральных зерен и связующего в структуре получаемого геоматериала, его деформационно-прочностные свойства. При объемном соотношении смол и породы 0,05–0,15 заполненность ее пустотного пространства отвержденным полимером составляет 40–50 %. Образующийся геоматериал имеет контактный тип структуры, в котором связующий материал локализуется в местах соприкосновения минеральных зерен. Образцы такого геоматериала выдерживают большие нагрузки, чем образцы с соотношением объемов высокоэластичной смолы и породы более 0,3, для которых заполнение пустотного пространства связующим полимером достигает 60 % и более. По мере уменьшения заполненности пустотного пространства геоматериалов отвержденным высокоэластичным составом с 75 до 43 % их механическая прочность увеличивается более чем в 2,5 раза. Напротив, значение деформации, соответствующее пределу прочности геоматериала, увеличивается с ростом содержания смолы.

Двухрастворный способ смешения песка с добавлением 5 об.% быстротвердеющего полиуретанового состава приводит к интенсивному образованию агрегатов отвержденного полимера в структуре рыхлой породы, связывающих минеральные зерна без сплошного заполнения межзерновых пустот, что значительно повышает прочность укрепленного песка при относительно малом расходе химических реагентов. Предел прочности получаемых геоматериалов увеличивается в 2–5 раз по сравнению с рыхлой породой до химического воздействия и в 1,3–2,3 раза относительно однорастворного способа смешения с высокоэластичной смолой в объемном соотношении с породой менее 0,3. Установлено, что в условиях трехосного сжатия образцы, полученные при двухрастворном способе смешения с композицией смол, выдерживают более значительные нагрузки, чем при однорастворном смешении только с одной медленно реагирующей высокоэластичной смолой. В случае объемного соотношения высокоэластичной смолы и породы более 0,3 образуются геоматериалы, выдерживающие лишь малые нагрузки, а добавление быстродействующего состава в этом случае неэффективно.

Практическая значимость полученных результатов состоит в повышении эффективности использования низковязких высокоэластичных полиуретановых смол при решении задач стабилизации рыхлых пород. Экспериментальные исследования показали, что спо-



соб двухрастворного смешения с добавлением быстродействующей полиуретановой смолы значительно повышает прочность пород. Выраженная нелинейная зависимость деформационно-прочностных свойств геоматериалов от способа смешения и объемного соотношения полиуретановых смол и породы свидетельствует о целесообразности оптимизации режимов химического воздействия с учетом решаемой геотехнической задачи. Это, с одной стороны, позволит

снизить расход дорогостоящих полимеров на единицу объема породы, а с другой – повысить механические свойства получаемых геоматериалов. В дальнейшем планируется исследовать закономерности изменения физико-механических и фильтрационных свойств рыхлых пород при использовании других типов полимеров, в частности органоминеральных смол, для решения задач стабилизации рыхлых пород в условиях горного давления и фильтрации подземных флюидов.

### Список литературы / References

1. Liu J., Qi X., Zhang D. et al. Study on the permeability characteristics of polyurethane soil stabilizer reinforced sand. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017;2017(1):5240186. <https://doi.org/10.1155/2017/5240186>
2. Shilova T., Serdyukov A., Serdyukov S., Ivanova O. Rock reinforcement by stepwise injection of two-component silicate resin. *Polymers*. 2022;14(23):5251. <https://doi.org/10.3390/polym14235251>
3. Пензев А.П., Самарин Е.Н., Шеховцова А.В. и др. Сравнение эффективности инъекционного закрепления песчаных грунтов в полевых и лабораторных условиях растворами на основе алифатической эпоксидной смолы. *Инженерная геология*. 2023;XVIII(4):50–62. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-4-50-62>  
Penzev A.P., Samarin E.N., Shekhovtsova A.V. et al. Comparison of the efficiency of injection stabilization of sandy soils in field and laboratory conditions with solutions based on aliphatic epoxy resin. *Engineering Geology World*. 2023;XVIII(4):50–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-4-50-62>
4. Исрафилов К.А., Харченко И.Я., Алексеев В.А. Стабилизация проницаемых грунтов модифицированными инъекционными суспензиями на основе коллоидного кремнезёма. *Системные технологии*. 2021;(3):21–26.  
Israfilov K.A., Kharchenko I.Ya., Alekseev V.A. Stabilization of permeable soils with modified in-equation sus-pensions based on colloidal silica. *System Technologies*. 2021;(3):21–26. (In Russ.)
5. Ma S., Ma M., Huang Z. et al. Research on the improvement of rainfall infiltration behavior of expansive soil slope by the protection of polymer waterproof coating. *Soils and Foundations*. 2023;63(3):101299. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101299>
6. Esmaeili M., Khajehei H. Mechanical behavior of embankments overlying on loose subgrade stabilized by deep mixed columns. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016;8(5):651–659. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.02.006>
7. Choobasti A.J., Kutanaei S.S. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017;9(5):981–988. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.03.015>
8. Васильев В.В. *Полимерные композиции в горном деле*. М.: Наука; 1986. 294 с.  
Vasiliev V.V. *Polymer compositions in mining*. Moscow: Nauka Publ. House; 1986. 294 p. (In Russ.)
9. 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;33:980–986. <https://doi.org/10.1007/s11595-018-1922-9>
10. Сафин А.Г., Сафин Р.Р. Geolift. Применение полиуретанов для стабилизации грунтов и усиления оснований. *Полимеры в строительстве*. 2024;1(12):26–29.  
Safin A.G., Safin R.R. Geolift. The use of polyurethanestostabilize soils and strengthenbases. *Polymers in Construction*. 2024;1(12):26–29. (In Russ.)
11. Cornely W. Elastified silicate resins and polyurethane foam resins for the stabilization of strata—a comparison. In: *Proceedings of the 6th International Seminary Reinforcement and Sealing of Rock and Construction at the Beginning of 21st Century*. Ostrava, Czech Republic, February; 2001.
12. De Souza F.M., Kahol P.K., Gupta R.K. Chapter 1. Introduction to polyurethane chemistry. In: *Polyurethane Chemistry: Renewable Polyols and Isocyanates*. Pittsburg: ASC Publications; 2021. Pp. 1–24. <https://doi.org/10.1021/bk-2021-1380.ch001>
13. Sabri M.M.S., Vatin N.I., Alsaffar K.A.M. Soil injection technology using an expandable polyurethane resin: a review. *Polymers*. 2021;13(21):3666. <https://doi.org/10.3390/polym13213666>
14. 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;(6):9811. <https://doi.org/10.18720/MCE.98.11>
15. Šňupárek R., Souček K. Laboratory testing of chemical grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2000;15(2):175–185. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00045-6)
16. Jinpeng Z., Limin L., Yang L. Mechanism and experiment of self-stress grouting reinforcement for fractured rock mass of underground engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023;131:104826. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104826>



17. Задирака А.А. Применение полиуретановых композитных составов для устройства оснований и/или покрытий транспортных сооружений. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2017;2(4):72–75. [https://doi.org/10.12737/article\\_58e61337c965d4.60850341](https://doi.org/10.12737/article_58e61337c965d4.60850341)  
Zadiraka A.A. The use of polyurethane formulations for composite devices bases and / or coatings of transport facilities. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*. 2017;2(4):72–75. (In Russ.) [https://doi.org/10.12737/article\\_58e61337c965d4.60850341](https://doi.org/10.12737/article_58e61337c965d4.60850341)
18. Шилова Т.В., Сердюк И.М., Сердюков С.В. и др. Изменение проницаемости рыхлой породы при неполном насыщении высокоэластичной полимерной смолой. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(1):26–32. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240103>  
Shilova T.V., Serdyuk I.M., Serdyukov S.V. et al. Change in permeability of loose rocks in partial impregnation with high-elastic polymer. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2024;(1):26–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240103>
19. Velez D., Alumbrosos D., Carpintero D. et al. Chapter: Consolidation and waterproofing by injection of PU resins. Ilarion Dam-treatment on the spillway tunnel. In: Anagnostou G., Benardos A., Marinou V.P. (Eds.) *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World. Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2023 (WTC 2023)*. 12–18 May 2023, Athens, Greece. London: CRC Press; 2023. Pp. 1048–1056. <https://doi.org/10.1201/9781003348030-125>
20. Аскадский А.А. Деформация полимеров. М.: Химия; 1973. 448 с.  
Askadsky A.A. *Polymer deformation*. M.: Khimiya Publ. House; 1973. 448 p. (In Russ.)
21. 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;42:101051. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101051>
22. Anagnostopoulos C.A., Papaliangas T., Manolopoulou S., Dimopoulos T. Physical and mechanical properties of chemically grouted sand. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011;26(6):718–724. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.05.006>
23. Liu J., Bu F., Bai Y. et al. Study on engineering properties of sand strengthened by mixed fibers and polyurethane organic polymer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020;79:3049–3062. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01751-9>
24. Wang J., Li X., Wang C. et al. Quantitative analysis of the representative volume element of polymer grouting materials based on geometric homogenization. *Construction and Building Materials*. 2021;300:124223. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124223>
25. Bodi J., Bodi Z., Scucka J., Martinec P. Chapter 14. Polyurethane grouting technologies. In: Zafar F., Sharmin E. (eds.) *Polyurethane*. IntechOpen; 2012. Pp. 307–336. <https://doi.org/10.5772/35791>

### Информация об авторах

**Татьяна Викторовна Шилова** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических методов воздействия на массив горных пород, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5056-9279](https://orcid.org/0000-0001-5056-9279), AuthorID [550745](https://orcid.org/550745); e-mail [shilovatanya@yandex.ru](mailto:shilovatanya@yandex.ru)

**Сергей Владимирович Сердюков** – доктор технических наук, заведующий лабораторией физических методов воздействия на массив горных пород, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1295-4122](https://orcid.org/0000-0002-1295-4122), Scopus ID [7003986765](https://orcid.org/7003986765), AuthorID [68479](https://orcid.org/68479); e-mail [ss3032@yandex.ru](mailto:ss3032@yandex.ru)

**Андрей Николаевич Дробчик** – инженер-исследователь лаборатории физических методов воздействия на массив горных пород, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0009-0002-7567-6497](https://orcid.org/0009-0002-7567-6497), AuthorID [1118483](https://orcid.org/1118483); e-mail [valker.tiamant@mail.ru](mailto:valker.tiamant@mail.ru)

### Information about the authors

**Tatiana V. Shilova** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of physical methods of impact on the rock mass, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5056-9279](https://orcid.org/0000-0001-5056-9279), AuthorID [550745](https://orcid.org/550745); e-mail [shilovatanya@yandex.ru](mailto:shilovatanya@yandex.ru)

**Sergey V. Serdyukov** – Dr. Sci. (Eng.), the Head of the Laboratory of physical methods of impact on the rock mass, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1295-4122](https://orcid.org/0000-0002-1295-4122), Scopus ID [7003986765](https://orcid.org/7003986765), AuthorID [68479](https://orcid.org/68479); e-mail [ss3032@yandex.ru](mailto:ss3032@yandex.ru)

**Andrey N. Drobchik** – Research Engineer of the the Laboratory of physical methods of impact on the rock mass, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0009-0002-7567-6497](https://orcid.org/0009-0002-7567-6497), AuthorID [1118483](https://orcid.org/1118483); e-mail [valker.tiamant@mail.ru](mailto:valker.tiamant@mail.ru)

Поступила в редакцию	30.08.2024	Received	30.08.2024
Поступила после рецензирования	04.12.2024	Revised	04.12.2024
Принята к публикации	06.12.2024	Accepted	06.12.2024