

## АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНОЙ ПОРОДЫ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПИЛ

Д. А. Озерский<sup>1</sup>, А. И. Орлова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

<sup>2</sup>АО «Красноярская горно-геологическая компания», Красноярск

Статья поступила в редакцию 26 октября 2022 г.

*В статье анализируется гипотеза о возможности применения результатов испытаний физико-механических свойств керна скважин, находящегося на хранении в воздушно-сухом состоянии, для оценки безопасности сооружений подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) с открытыми сводами, а также представлены подходы к классификации архейских гнейсов участка «Енисейский» по прочности.*

**Ключевые слова:** подземная исследовательская лаборатория, гнейсы, керн, индекс геологической прочности, предел прочности на одноосное сжатие, радиоактивные отходы.

### Влияние внешних факторов на определение физико-механических свойств

В рамках обоснования долговременной безопасности глубинного захоронения радиоактивных отходов (РАО) в недрах участка «Енисейский» планируется создание ПИЛ. Она представляет собой комплекс подземных горных выработок исследовательского и вспомогательного назначения, большая часть которых будет сконцентрирована на целевом интервале глубин 450—525 метров. В соответствии с действующим законодательством России, ПИЛ как подземный производственный объект относится к категории опасных, и на весь период ее эксплуатации должна быть обеспечена безопасность проведения долговременных натуральных исследований массива горных пород участка «Енисейский», сопровождающихся длительным контактом тепла и атмосферного воздуха с обнаженными участками в выработках.

Основная задача создания ПИЛ — доказать возможность захоронения в ее недрах высокоактивных и долгоживущих РАО, детально изучить характеристики и параметры горного массива как для обоснования долговременной безопасности объекта обращения с указанным видом отходов, так и в практических целях соблюдения норм безопасности трудового персонала лаборатории. Учитывая долгосрочную перспективу использования объекта, необходимо изучить взаимодействие породы и компонентов окружающей среды, которое может вызвать изменение прочностных свойств.

Длительный период эксплуатации выработок ПИЛ и возможные перспективы их задействования для создания пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) приводят к необходимости проведения оценки последствий воздействия

внешних факторов на массив в части изменения его прочностных свойств. Представленный материал посвящен результатам сравнительного анализа характеристик долговечности образцов горных пород, полученных по результатам испытаний свежих проб керна и материалов, подвергшихся длительному воздействию атмосферного воздуха, и постановке задачи дальнейших исследований.

Для горных пород характерно следующее: с ростом степени атмосферного воздействия (выветривания) увеличивается пористость, а также объем заполнителя пор, что снижает прочность образцов. Это может сопровождаться и видимыми изменениями, например выцветанием, растрескиванием и т. п. [10]. В результате выветривания также уменьшается несущая способность горных пород. Тем не менее атмосферостойкость некоторых из них, таких как сланцы и аргиллиты, достаточно изменчива, и существуют породы, которые не теряют своих прочностных свойств. Важны также комбинация факторов и продолжительность воздействия окружающей среды, его цикличность (например, смачивание-сушка, замораживание-оттаивание и т. д.). Кроме того, влияние оказывают содержание минералов и их распределение в объеме породы: атмосферостойкие (кварц, полевой шпат и т. д.) определяют устойчивость к внешним факторам; подверженные атмосферным воздействиям (биотит, мусковит, роговая обманка и др.) влияют на степень выветривания. При их оценке следует проводить дополнительные испытания на прочность при стандартном цикле сушки и смачивания [9].

#### Рейтинговые классификации массива гнейсов участка «Енисейский»

Гнейсы участка «Енисейский» по данным геологического изучения и инженерно-геологических изысканий содержат биотиты и мусковиты, однако они тяготеют в основном к верхам разреза. В то же время мелкозернистая структура и наличие включений кварца на контактах даек и трещин и калишпатизация гнейсов и долеритов в разрезе глубоких горизонтов определяют возможность сохранения прочностных свойств в контактной зоне с воздухом.

В настоящее время потребность в данных исследованиях существует в связи с началом строительства подземных сооружений ПИЛ. Необходимость изучения взаимного влияния в системе «горная порода — атмосферный воздух» определяется планами выполнения работ на породных обнажениях. Такие стендовые зоны

на вертикальных стволах и в горизонтальных тоннелях должны появиться в проекте при его корректировке. Кроме того, требуется соорудить отдельные выработки исследовательского назначения, и вопрос устойчивости их сводов и стенок становится весьма актуальным.

Определение типа крепления подземных горных выработок проводится в соответствии с  $Q$ -индексом Н. Бартона. Для его исчисления определяется показатель качества породы RQD как отношение общей длины сохранных кусков керна длиной более 10 см к длине пробуренного интервала в скважине [6]. В формулу также входят показатели количества систем трещин, шероховатости поверхности трещин, измененности трещин; водный фактор; фактор снижения напряжений.

При оценке устойчивости подземных сооружений широко применяются рейтинговые системы классификации породных массивов [7]. Для качественных оценок устойчивости стенок и сводов горных выработок используется система RMR (рейтинг массива горных пород З. Бенявского, 1973 г.) и индекс GSI (индекс геологической прочности Хука—Брауна, 1994 г.). Анализ прочностных характеристик горной породы осуществляется по этому критерию, который определяется в зависимости от категории устойчивости массива по рейтингу RMR. Эта система включает в себя физико-механические параметры и структурные показатели массива, характеризующие прочность пород на одноосное сжатие, показатель качества пород, расстояние между трещинами, их направление относительно оси выработки, условия трещиноватости (шероховатость, длина, выветрелость трещин и др.), условия обводненности [2].

Параметры, характеризующие трещиноватость горной породы, по нашему предположению, с течением времени не являются изменяемыми в кернах скважинного бурения, следовательно, на численные значения рейтингов RQD и RMR воздействовать не могут. Соответственно, на величину показателей систем оценки качества породы в большей степени влияют значения прочностных характеристик, которые исследуются при нахождении горной породы в естественных условиях, а также при испытаниях образцов пород в лабораториях.

Хранение породы скважин в кернохранилищах длительное время обуславливает ее нахождение в постоянном контакте с атмосферным воздухом, что обеспечивает воздушно-сухое состояние, и, следовательно, влияет на ее прочность за счет потери связанной воды из пор и микротрещин, высыхания заполнителей и т. д.

Гипотетически схожее состояние горной породы будет наблюдаться в пришахтной зоне незакрепленных выработок за счет их принудительной вентиляции.

**Лабораторные испытания**

Нами было проведено 20 лабораторных испытаний по исследованию свойств kernового материала архейских гнейсов, полученных с глубин 300–500 м от поверхности, близких к целевому интервалу. Были определены их физико-механические характеристики по стандартному перечню: плотность грунта, пористость, модули упругости и деформации, коэффициент Пуассона, а также предел прочности на одноосное сжатие – устойчивость породы к вертикальным нагрузкам (МПа) – как в сухом, так и в водонасыщенном состоянии. Именно этот показатель был интересен для решения задач исследования влияния времени на изменение прочности гнейсового материала.

Изучение керна горных пород на прочность осуществлялось на гидравлическом прессе П-125 с использованием метода одноосного сжатия образцов правильной формы плоскими плитами [5]. В качестве прокладок между торцами образцов и опорными пластинами испытательной машины применялись стальные плиты толщиной не менее 0,3 диаметра (стороны квадрата) образца и диаметром, на 3–5 мм превышающим диаметр (диагональ квадрата) образца, которые имеют плоскопараллельные рабочие поверхности с классом шероховатости 7 по ГОСТ 2789 и твердостью по Роквеллу HRC 55–60 ед. Исследованиям были подвергнуты 10 проб: 4 образца скважины №Р-11 (диаметром 4,6 см) и 6 образцов скважины №Р-12 (диаметром 6,3 см), находящихся в сухом и водонасыщенном состоянии. Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Испытания керна на одноосное сжатие**

Номер скважины	В сухом состоянии		В водонасыщенном состоянии	
	до испытания	после испытания	до испытания	после испытания
Р-11				
Р-12				

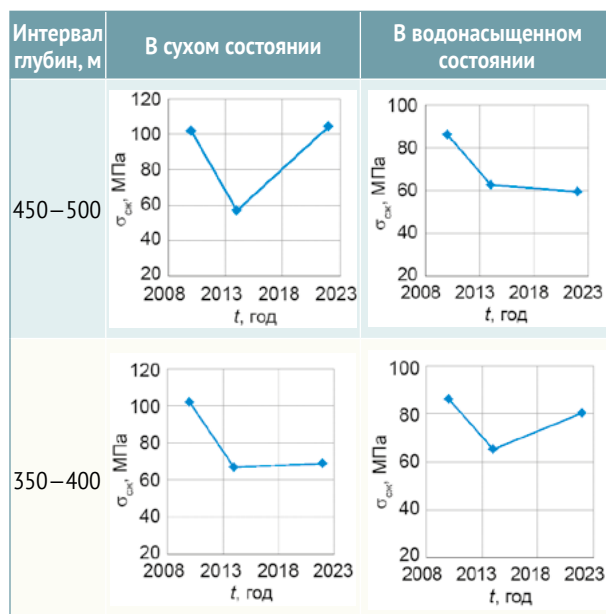
Численные результаты исследования прочности горной породы на одноосное сжатие представлены в табл. 2. В зависимости от глубины отбора образцов горной породы данный показатель для пробы №Р-11 в сухом и водонасыщенном состоянии составляет соответственно 104,24 и 59,32 МПа, а для пробы №Р-12 – 68,80 и 80,50 МПа.

**Таблица 2. Прочностные показатели горной породы на одноосное сжатие по результатам проведенного испытания**

Номер скважины	Глубина отбора, м	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа							
		В сухом состоянии				В водонасыщенном состоянии			
		1 изм.	2 изм.	3 изм.	среднее	1 изм.	2 изм.	3 изм.	среднее
Р-11	482	112,43	96,05	-	104,24	63,28	55,37	-	59,32
Р-12	370	94,87	61,86	49,68	68,80	72,12	86,86	82,50	80,50

Сравнения полученных нами значений прочностных характеристик и данных лабораторных исследований, проведенных в 2010–2011 гг., 2012–2014 гг. и 2022 г., представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Графики изменения прочности на одноосное сжатие образцов из скважин**



Основные результаты испытаний прочности на одноосное сжатие образцов архейских гнейсов, полученные лабораторным путем, согласно графикам, находятся в интервале от 60 МПа, а в отдельных случаях – от 100 МПа и более.

На основании данных, представленных в табл. 3, зафиксировано, что изучаемый показатель находится в пределах того же интервала величин, что

и в свежем керне. Следовательно, предел прочности при одноосном сжатии можно считать не снижающимся во времени.

Величины коэффициентов крепости пород по М. М. Протоdjяконову [4] для образцов керна, отобранных из скважин Р-11 и Р-12, в сухом и водонасыщенном состоянии приведены в табл. 4.

**Таблица 4. Определение коэффициента крепости пород по классификации М. М. Протоdjяконова [4]**

Номер скважины	Коэффициент крепости $f$ по классификации М. М. Протоdjяконова	
	в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии
Р-11	10,42	5,93
Р-12	6,88	8,05

Рассчитанные в соответствии со шкалой М. М. Протоdjяконова коэффициенты крепости пород позволяют отнести архейские гнейсы из скважин Р-11 и Р-12 к категориям от довольно

крепких (категория IVa — с признаками расланцевания) до крепких (категория III — близкие к гранитам).

#### Устойчивость и безопасность выработок

Показатели RQD определялись для пород участка «Енисейский» в ходе полевого документирования керна до укладки его в ящики. Его основная масса имеет показатели качества на уровне 90—99 %, что указывает на выход керна с малым числом трещин. Поинтервальное осреднение RQD также выявило достаточную целостность массива с 90—100 %-м качеством пород.

На основании полученных результатов лабораторных испытаний по определению прочностных и физико-механических свойств можно сделать вывод, что архейские гнейсы по диаграмме для оценки геологического показателя прочности массива (GSI) Хука—Брауна, представленной на рис. 1, относятся к неповрежденным и блочным породам с очень хорошим

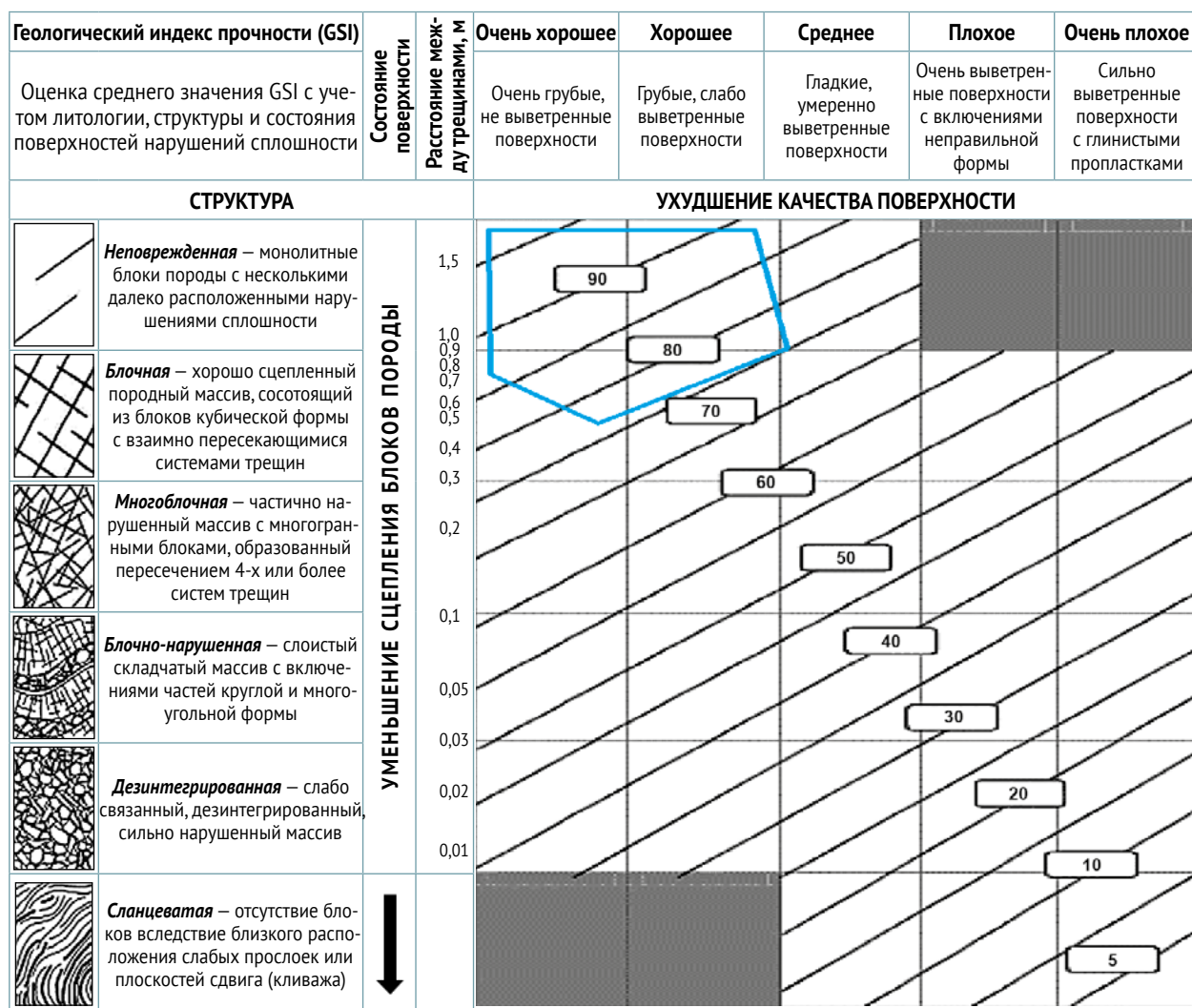


Рис. 1. Ожидаемая область значений геологического показателя прочности массива (GSI) на диаграмме Хука—Брауна

и хорошим качеством поверхности. Ожидаемые рейтинговые оценки будут находиться в интервале от 70 баллов и выше.

На этой диаграмме по горизонтали отложена качественная характеристика поверхностей трещин в скальном массиве, по вертикали — характер его строения. Цифры по диагонали показывают величину показателя GSI. В основу оценки устойчивости подземных горных выработок при создании геомеханических моделей закладываются такие параметры, как предел прочности на одноосное сжатие в образце [3].

Связь RMR и GSI должна определяться применительно к изучаемым породам, но ранее установленные отношения находятся в приближении к линейным зависимостям, в частности, для метаморфических пород:  $GSI = 0,95RMR - 10,44$  [10]. Соответственно, ожидаемые RMR для гнейсов в целевых интервалах будут находиться в пределах 80 и выше.

Согласно номограмме применения RMR [1] для определения времени устойчивости выработок с учетом величины пролета (рис. 2), такие породы пригодны для проходки в них горных выработок с целью строительства ПИЛ на участке недр, поскольку аварийных ситуаций, связанных с недостаточной устойчивостью, не ожидается в перспективе нескольких лет благодаря закреплению пролетов на десятиметровых участках, что способствует обеспечению безопасных условий труда проходчиков и других работников, осуществляющих подземное строительство. Увеличение частоты закрепления пролетов позволит довести их безопасную эксплуатацию до десятков лет.

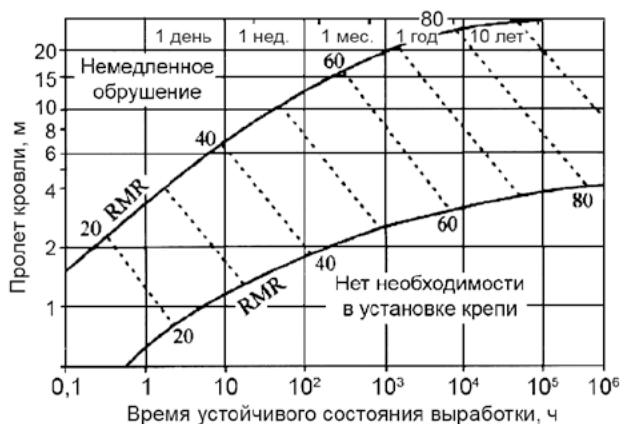


Рис. 2. Номограмма величины пролета и время устойчивости выработки

Стоит отметить, что полученные значения прочности на одноосное сжатие образцов, находящихся в сухом состоянии, больше, чем в водонасыщенном, следовательно, при строительстве

подземных сооружений предполагаемое нами осушение пришахтных зон горного массива при откачке подземных вод и вентиляции горных выработок скажется положительно на их устойчивости.

Полученные данные лабораторных испытаний подтверждают надежность проектных мероприятий и необходимость дальнейшего укрепления стенок и сводов подземных горных выработок для обеспечения безопасности трудового персонала лаборатории на этапе корректировки проектной документации.

Развитие экспериментальной деятельности в отношении архейских гнейсов участка «Енисейский» осуществляется постоянно. В область исследований входят также термические и диффузионные эксперименты, петрографические анализы, скважинные методы оценок трещиноватости и др. Физико-механические свойства также продолжают доизучаются. Сколковским институтом науки и технологий определены параметры прочностных свойств скальной породы участка «Енисейский» на трехосное сжатие, которые позволят уточнить расчетные характеристики устойчивости.

Для обоснования проведения мероприятий по строительству выработок в ПИЛ, стенки и своды которых не будут закреплены в связи с функционалом данных помещений, требуется совершенствование технологий экспериментов, а также развитие аналитической базы данных по целевым горизонтам, в т. ч. представительного набора физико-механических параметров.

## Литература

1. Аксой С. О. Системы классификации массивов горных пород: историческое развитие, области применения, ограничения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2008. № 1. С. 56—68.
2. Ахмет Д. М., Каукунов Ж. С. Исследование параметров устойчивости массива горных пород на основе рейтинговых классификаций // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина. Томск, 3—7 апреля 2017 г.: в 2 т. Т. 2. — Томск: Изд-во ТПУ, 2017. С. 564—565.
3. Бушков В. К., Шеметов Р. С. Определение устойчивости и обоснование систем крепления горных выработок при переходе к отработке Олимпиадинского месторождения подземным способом // Горный информационно-

аналитический бюллетень. 2020. №9. С. 40–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54.

4. ГОСТ 21153.1-75. Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протоджякову: государственный стандарт: дата введения 01.07.1976 / Изд. официальное. — Москва, Госстандарт СССР, 1981. — 3 с.

5. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии: межгосударственный стандарт: дата введения 01.07.1986 / Изд. официальное. — Москва, Госстандарт СССР, 1984. — 8 с.

6. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация: межгосударственный стандарт: дата введения 01.01.2021 / Изд. официальное — Москва, Стандартинформ, 2020. — 38 с.

7. Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г., Бабкин Е. А. Оценка состояния массива горных пород на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 1. С. 5–17.

8. Patel A. Classification of Weathering in Rocks and Its Engineering Implications // Civil Engineering Research Journal. 2017. No. 2 (3). Pp. 53–57.

9. Arikan F., Aydin N. Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dacites in Northeastern Turkey. International Scholarly Research Notices. 2012. Vol. 2012. DOI: 10.5402/2012/218527.

10. Ceballos F., Olalla C., Jiménez R. Relationship between RMRb and GSI based on in situ data // ISRM European rock mechanics symposium. EUROCK Vigo. Madrid, 2014. DOI: 10.13140/2.1.1813.3768.

### Информация об авторах

Озерский Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

Орлова Алена Игоревна, инженер-эколог, АО «Красноярская горно-геологическая компания» (660049, Красноярск, ул. К. Маркса, д. 62), e-mail: oai@krasgeo.ru.

### Библиографическое описание статьи

Озерский Д. А., Орлова А. И. Анализ прочностных характеристик горной породы для обоснования безопасности строительства подземных сооружений ПИЛ // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 70–76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76.

## STRENGTH CHARACTERISTICS OF ROCK AND THEIR ANALYSIS IN THE CONSTRUCTION SAFETY ASSESSMENT OF UNDERGROUND URF STRUCTURES

Ozersky D. A.<sup>1</sup>, Orlova A. I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC Krasnoyarsk Mining and Geological Company, Krasnoyarsk, Russia

Article received on October 26, 2022

*The paper evaluates the hypothesis regarding potential application of testing results focused on physical and mechanical properties of well cores stored in an air-dry state to the safety assessment of underground URF structures with open arches. It also presents approaches to the categorization of the Archean gneisses at the Yeniseiskiy site according to the strength characteristics.*

**Keywords:** *underground research facility, gneiss, core, geological strength index, uniaxial compressive strength, radioactive waste.*

### References

1. Aksoy S. O. Sistemy klassifikatsii massivov gornykh porod: istoricheskoye razvitiye, oblasti primeneniya, ogranicheniya [Review of Rock Mass Rating Classification: Historical Developments,

Applications, and Restrictions]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh — Journal of Mining Science*, 2008, no. 1, pp. 56–68.

2. Akhmet D. M., Kaukenov Zh. S. Issledovaniye parametrov ustoychivosti massiva gornykh porod na osnove reytingovykh klassifikatsiy [Study of rock

mass stability parameters based on rating classification systems]. *Problemy geologii i osvoyeniya nedr: trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M. I. Kuchina* [Problems of Geology and Mineral Development: Proceedings of the XXI International Symposium named after the Member of RAS M. A. Usov for students and young scientists dedicated to the 130th birthday anniversary of Professor M. I. Kuchin]. Tomsk, April 3–7, 2017. Vol. 2. — Tomsk, TPU Publ., 2017. Pp. 564–565.

3. Bushkov V. K., Shemetov R. S. Opredeleniye ustoychivosti i obosnovaniye sistem krepleniya gornykh vyrabotok pri perekhode k otrabotke Olimpiadinskogo mestorozhdeniya podzemnym sposobom [Stability Estimation and Justification of Support Systems in Transition to Underground Mining in the Olimpiada Deposit]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' — Mining Information and Analytical Bulletin*, 2020, no. 9, pp. 40–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54.

4. GOST 21153.1-75. *Porody gornyye. Metod opredeleniya koeffitsiyenta kreposti po Protodyakonovu* [Rocks. Method for the determination of strength factor according to Protodyakonov]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1981. 3 p.

5. GOST 21153.2-84. *Porody gornyye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii* [Rocks. Methods for determination of axial compression strength]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1984. 8 p.

6. GOST 25100-2020. *Grunty. Klassifikatsiya* [Soils. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 38 p.

7. Yeremenko V. A., Aynbinder I. I., Patskevich P. G., Babkin Ye. A. Otsenka sostoyaniya massiva gornykh porod na rudnikakh ZF OAO «GMK «Noril'skiy nikel'» [Assessment of the State of Rocks in Underground Mines at the Polar Division of Norilsk Nickel]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' — Mining Information and Analytical Bulletin*, 2017, no. 1, pp. 5–17.

8. Patel A. Classification of Weathering in Rocks and Its Engineering Implications. *Civil Engineering Research Journal*, 2017, no. 2 (3), pp. 53–57.

9. Arıkan F., Aydin N. Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dacites in Northeastern Turkey. *International Scholarly Research Notices*, 2012, vol. 2012. DOI: 10.5402/2012/218527.

10. Ceballos F., Olalla C., Jiménez R. Relationship between RMRb and GSI based on in situ data. *ISRM European rock mechanics symposium*. EUROCK Vigo. Madrid, 2014. DOI: 10.13140/2.1.1813.3768.

---

### Information about the authors

*Ozersky Dmitry Andreevich*, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

*Orlova Alyona Igorevna*, environmental engineer, JSC Krasnoyarsk Mining and Geological Company (62, K. Marx st., Krasnoyarsk, 660049, Russia), e-mail: oai@krasgeo.ru.

### Bibliographic description

Ozersky D. A., Orlova A. I. Strength Characteristics of Rock and their Analysis in the Construction Safety Assessment of Underground URF Structures. *Radioactive Waste*, 2023, no. 1 (22), pp. 70–76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76. (In Russian).