

УДК 622.831.3:622.02

Харисов Тимур Фаритович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией геомеханики
подземных сооружений,
Институт горного дела УрО РАН
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 58;
доцент кафедры шахтного строительства,
Уральский государственный
горный университет,
г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Авдеев Аркадий Николаевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН

Коптяков Дмитрий Александрович

научный сотрудник,
лаборатория геомеханики
подземных сооружений,
Институт горного дела УрО РАН,
e-mail: koptyakov_d@mail.ru

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ
ПОРОД В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ***

Аннотация:

В работе описываются и сравниваются методы определения модуля упругости горных пород при их одноосном нагружении. Испытания с предварительным уплотнением образцов, при котором деформации измеряются экстензометрами, как правило, дают наилучшие результаты. Разница между сравниваемыми методами при определении модуля упругости достигает 25 %. Из анализа результатов был сделан вывод, что на результаты определения упругих постоянных при испытаниях в условиях одноосного сжатия влияет выбор прямолинейного участка кривой напряжение-деформация.

Ключевые слова: модуль упругости, модуль деформации, предел прочности при одноосном сжатии, продольные и поперечные деформации, упругость горных пород, перидотиты, Баженовское месторождение, кривая напряжение-деформация.

DOI:

Kharisov Timur F.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of geomechanics
of underground structures,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiriyaka Str.;
Associate Professor of the Department
of Mine Construction.
Ural State Mining University,
620026 Ekaterinburg,
30 Kuibysheva Str.

Avdeev Arkady N.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of geodynamics and mountain pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

Koptyakov Dmitry A.

Researcher,
Laboratory of geomechanics
of underground structures, Institute of Mining,
Ural Branch of RAS
e-mail: koptyakov_d@mail.ru

**RESULTS ANALYSIS OF DETERMINING
THE ELASTIC CHARACTERISTICS
OF ROCKS IN THE LABORATORY
CONDITIONS**

Abstract:

The paper describes and compares methods for determining the modulus of elasticity of rocks under uniaxial loading. Tests with pre-compaction of samples, in which deformations measured with extensometers, usually give the best results. The difference between the compared methods when determining the modulus of elasticity reaches 25 %. From the analysis of the results, we noted that the results of determining elastic constants, when tested under uniaxial compression conditions are influenced by the choice of a rectilinear section of the stress-strain curve.

Key words: modulus of elasticity, modulus of deformation, tensile strength under uniaxial compression, axial and lateral deformations, rock elasticity, peridotites, Bazhenovskoye deposit, stress-strain curve.

* Статья подготовлена по материалам выполнения госзадания № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024) «Разработка геoinформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недروпользовании» (FUWE-2022-0002), рег. № 1021062010532-7-1.5.1.

Введение

Для оценки степени защищенности горнопромышленных территорий и прогноза негативных последствий добычи необходимы наблюдения за массивом в контексте понимания изменчивости свойств горных пород. Получаемые в ходе лабораторных определений сведения о поведении горных пород дополняют обоснованность технологических решений и дают основу для мониторинга и прогнозирования развития негативных процессов при эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых.

Свойства, характеризующие поведение пород под воздействием механических усилий, проявляются в их сопротивлении разрушению и деформации. Определение механических характеристик в лабораторных условиях представляет из себя исследование закономерностей изменений зависимости напряжений и деформаций. Условия приложения нагрузки, ее величина, скорость приложения, длительность действия могут оказывать влияние на однозначность зависимости напряжений и деформаций [1–5]. Применительно к горным породам, упругие характеристики: модуль Юнга, коэффициент Пуассона – определяются по линейному участку диаграммы напряжения-деформации [6, 7]. При этом процедуры испытаний и определений деформационных свойств, принятые в различных стандартах, имеют некоторые отличия, что может вносить неопределенность в природу характера деформаций горных пород [7–9].

В работе представлен сравнительный анализ методов определения механических свойств горных пород: ASTM D7012, DIN EN 14580 и ГОСТ 28985 [10–12]. Каждый из методов предлагает подход к определению деформационных свойств, имея особенности и применимость в различных условиях. Цель исследования – предоставить всестороннее сравнение результатов, полученных с использованием методик, выявить отличия и определить степень разброса значений модуля упругости между методами.

Систематизированный анализ результатов позволит лучше понять особенности каждого метода, предложить рекомендации для оптимизации процессов измерений, выявить возможные пробелы и неопределенности в стандартах.

Материалы и методы

Для проведения исследования были рассмотрены горные породы Баженовского месторождения: перидотиты, габбро, диориты, серпентиниты и тальк-карбонатные метасоматиты (рис. 1). Выбор был сделан в том числе на основе доступности материалов и изученности месторождения [13, 14]. Куски породы – штуфы – отбирались без учета возможного влияния буровзрывных работ, процессов выветривания и без видимых нарушений. Линейные размеры кусков породы составили не менее 200×200×200 мм.

Каждый штуф был осмотрен для исключения видимых трещин, неоднородностей и включений, которые могли бы привести к неверной интерпретации результатов. Дальнейшая подготовка образцов, пригодных для определения упругих свойств, соответствовала процедурам, описанным в ASTM D4543 и ГОСТ 21153.0 с учетом ASTM D7012 и ГОСТ 28985, и заключалась в изготовлении цилиндров правильной геометрической формы с установленными допусками при отношении длины к диаметру не менее 2. Выбуривание кернов из отобранных штуфов производилось установкой Husqvarna DMS160A с подачей воды при оборотах до 1000 в минуту. Для образования торцевых поверхностей и обеспечения их параллельности использовались камнерезная и шлифовальная установки СВК-1000 и СОТОК-1А, соответственно, при оборотах до 1000 в минуту. Все образцы были высушены в нормальных условиях для проведения испытаний в воздушно-сухом состоянии.



Рис. 1. Снимок Баженовского месторождения хризотил-асбеста и места отбора проб горной породы:

П – перидотиты, Габбро, Тальк-Карбонаты; Д – диориты; Д-КЗ – диориты крупнозернистые

Лабораторные испытания

Используемый пресс производства APS GmbH Wille Geotechnik для испытания образцов горной породы представляет из себя гидравлический агрегат с датчиком давления и нагрузочную раму 30101-A2-001 (1500 кН). Для приложения вертикальной нагрузки к образцу пресс оснащен приспособлением одноосного сжатия со сферическим шарниром ГТ 2.5.11 производства НПП ГЕОТЕК. Образцы горной породы и датчики деформаций помещаются на базовую опору и закрепляются симметрично, вдоль оси приложения нагрузки (рис. 2).



Рис. 2. Приспособление одноосного сжатия и датчики измерения деформаций образца горной породы

Изменения прилагаемой нагрузки и базы датчиков фиксировались с помощью электронно-преобразующего блока ГТ 6.0.31. Затем для определения предела прочности при одноосном сжатии образцы нагружали с постоянной скоростью до их разрушения.

Для изучения деформационных свойств образцов горной породы использовалась система датчиков продольной и поперечной деформаций, работающих совместно с электронно-преобразующим блоком ГТ 6.0.31 и программным комплексом АСИС. Система сбора данных непрерывно регистрирует величину нагрузки и соответствующие перемещения датчиков деформаций, а также времени на протяжении всех испытаний. Определение прочности при одноосном сжатии в образце горной породы необходимо для планирования условий нагружения горной породы при определении ее упругих характеристик. В случае обнаружения нехарактерных для данной породы дефектов (трещины, видимые повреждения, жилы, вкрапления) результаты испытаний рассматривались отдельно или принимались как недействительные.

Определения деформационных характеристик были проведены на подготовленных образцах в соответствии с ASTM D7012, ГОСТ 28985 и DIN EN 14580. Гидравлический агрегат и программное обеспечение были модифицированы таким образом, чтобы обеспечивалась многократность нагрузки-разгрузки образца до заданной величины осевой нагрузки (рис. 3).

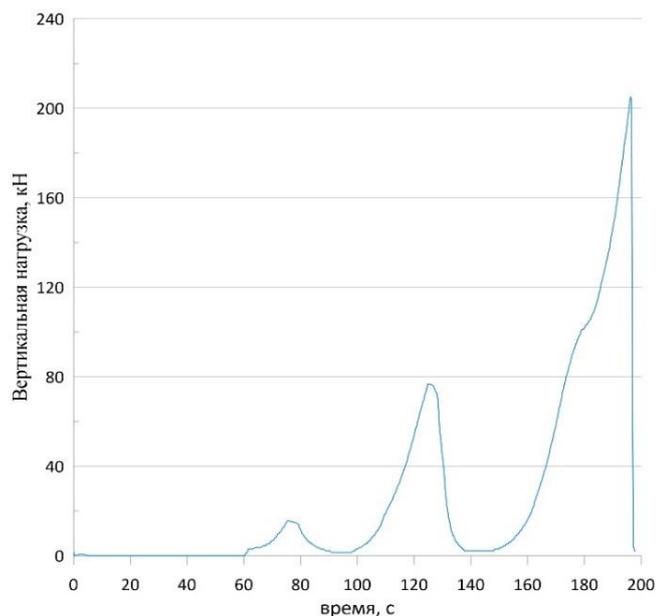


Рис. 3. Предварительное уплотнение образца и его разрушение

Упругие свойства определялись по диаграммам напряжение-деформация при заданных интервалах напряжений. Образцы, содержащие какие-либо скрытые повреждения, не учитывались в результатах.

Обработка и анализ результатов испытаний

В общем случае напряжение при сжатии в испытуемом образце, σ (МПа) рассчитывалось путем деления осевой нагрузки P (кН) на начальную площадь поперечного сечения A_0 (см²):

$$\sigma = P/A_0. \quad (1)$$

Для определения предела прочности при одноосном сжатии σ_u (МПа) принималось пиковое значение нагрузки P (кН). И в случае отличия размеров образца от рекомендуемых вводится безразмерный поправочный коэффициент k в соответствии с нормативной документацией.

Осевая деформация ε_a рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon_a = \Delta l / l, \quad (2)$$

где l – база измерения осевой деформации образца, мм; Δl – изменение базы при изменении нагрузки на образце, мм.

Поперечная деформация ε_l рассчитывается так:

$$\varepsilon_l = \Delta d / d, \quad (3)$$

где d – диаметр образца до приложения нагрузки, мм; Δd – изменение диаметра при изменении нагрузки на образце, мм.

В ASTM D7012 модуль упругости (Юнга) определяется по графику напряжение-деформация: касательный E_t – по тангенсу угла наклона при заданном уровне напряжений; средний E_{av} – по наклону линейного участка; секущий E_s – по наклону секущей из начала координат (рис. 4). Коэффициент Пуассона ν может быть рассчитан аналогичным способом, при котором определялся модуль Юнга.

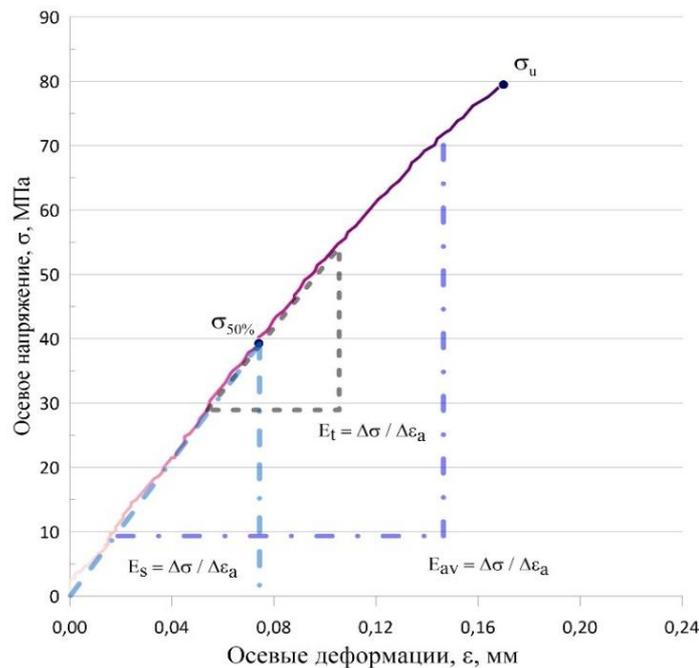


Рис. 4. Способы определения модуля упругости (Юнга), рассматриваемые в ASTM D7012: E_t – касательный, E_{av} – средний, E_s – секущий

Относительная объемная деформация ε_v рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2 \varepsilon_d. \quad (4)$$

Предварительное уплотнение образцов (рис. 5) необходимо при определении модуля упругости по DIN EN 14580, который рассчитывается на участке кривой, соответствующей 2...33 % от предела прочности σ_u :

$$E = (0,33\sigma_u - 0,02\sigma_u) / (\varepsilon_{a0,33} - \varepsilon_{a0,02}), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{a0,02}$ и $\varepsilon_{a0,33}$ – измеренные осевые деформации при уровне напряжений $0,02 \sigma_u$ и $0,33 \sigma_u$.

При определении упругих свойств по ГОСТ 28985 (рис. 6) модуль деформации E_d и коэффициент поперечной деформации ν рассчитывались на заданном интервале напряжений $\sigma_H \dots \sigma_K$ по нагрузочной ветви зависимости $\sigma - \varepsilon$:

$$E_d = (\sigma_K - \sigma_H) / (\varepsilon_{1K} - \varepsilon_{1H}); \quad (6)$$

$$\nu = (\varepsilon_{2K} - \varepsilon_{2H}) / (\varepsilon_{1K} - \varepsilon_{1H}), \quad (7)$$

где ε_{1K} и ε_{1H} – относительные продольные деформации образца при заданном уровне напряжений; ε_{2K} и ε_{2H} – относительные поперечные деформации образца при том же уровне напряжений.

Аналогично, модуль упругости E_Y и коэффициент Пуассона μ рассчитываются в этом же диапазоне напряжений $\sigma_H \dots \sigma_K$, но по разгрузочной ветви $\sigma - \varepsilon$:

$$E_Y = (\sigma_K - \sigma_H) / (\varepsilon'_{1K} - \varepsilon'_{1H}); \quad (8)$$

$$\mu = (\varepsilon'_{2K} - \varepsilon'_{2H}) / (\varepsilon'_{1K} - \varepsilon'_{1H}), \quad (9)$$

где $\varepsilon'_{1K}, \varepsilon'_{1H}, \varepsilon'_{2K} - \varepsilon'_{2H}$ – относительные продольные и поперечные деформации при разгрузке.

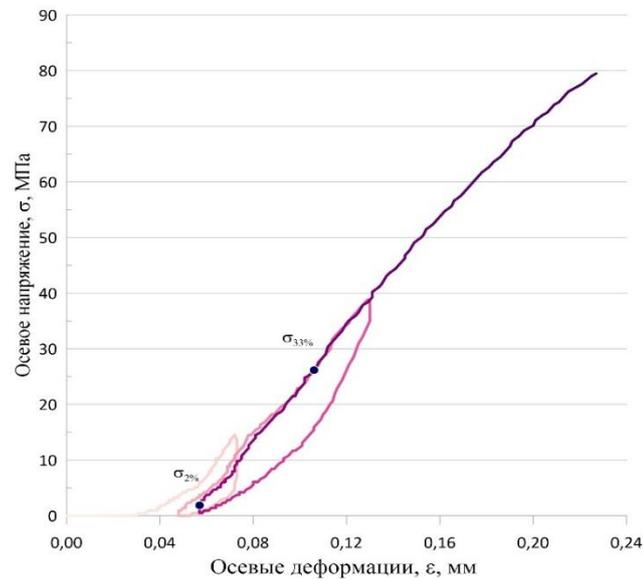


Рис. 5. Определение модуля упругости при нагружении образца после предварительного уплотнения в заданном интервале напряжений

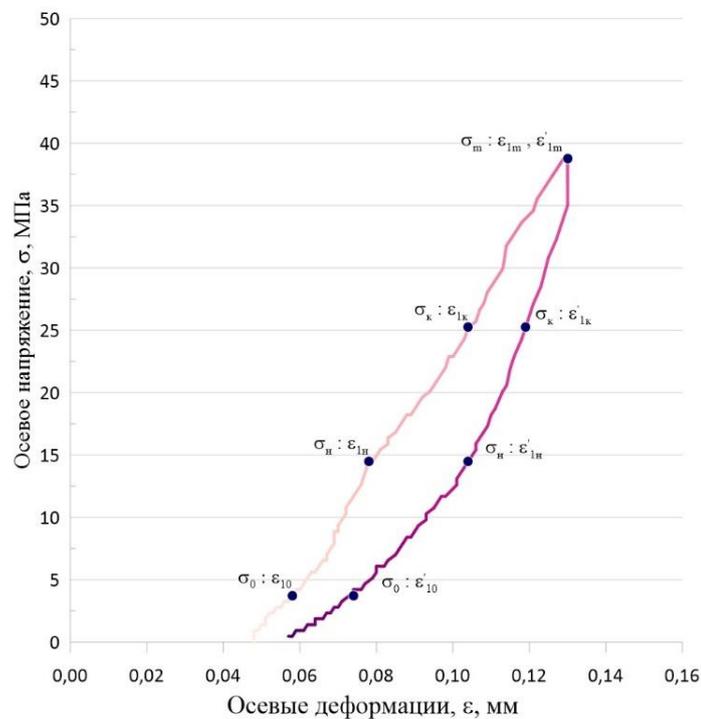


Рис. 6. Определение упругих свойств по ГОСТ 28985

Результаты

В «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии» ГОСТ 28985 модуль упругости следует определять в диапазоне требуемых напряжений от 5 до 50 % от предела прочности при одноосном сжатии σ_u .

Модуль упругости E_u определен по ветви разгрузки образца в интервале заданных напряжений. Эмпирически установлено, что верхняя граница упругого участка графика лежит, как правило, в интервале 30 – 50 % от предела прочности на сжатие. Перидотиты демонстрируют значительное разнообразие в значениях модуля упругости. Среднее значение модуля упругости для перидотитов составляет 39461 МПа.

Значения модуля упругости по ASTM D7012 подчеркивают различия в результатах, полученных при применении методик, и свидетельствуют о необходимости дополнительных исследований для установления границ линейного участка графика «напряжение-деформация».

Методика испытаний образцов горных пород и расчета модуля упругости DIN EN 14580 предусматривает предварительное уплотнение образцов путем последовательной его нагрузки и разгрузки. Для расчета используются значения, зафиксированные при третьем нагружении образца. Модуль упругости E вычисляется при диапазоне напряжений 2 – 33 % от предела прочности исследуемой породы.

Сравнение с результатами по ASTM D7012, DIN EN 14580, ГОСТ 28985

В табл. 1 представлено сопоставление результатов модуля упругости по методикам ASTM D7012 ГОСТ 28985 и DIN EN 14580. Видно, что значения модуля упругости различаются в зависимости от примененной методики. Максимальные значения были получены по ASTM D7012, в то время как минимальные - по DIN EN 14580. Разброс значений между максимальным и минимальным составил 25 %.

Таблица 1

Результаты расчетов модуля упругости по методикам ASTM D7012, DIN EN 14580 и ГОСТ 28985

Проба №	Образец №	Касательный модуль упругости (ASTM D7012) E_t , МПа	Средний модуль упругости (ASTM D7012) E_{av} , МПа	Секущий модуль упругости (ASTM D7012-10) E_c , МПа	Модуль упругости E (DIN EN 14580), МПа	Модуль упругости E_u , МПа (ГОСТ 28985)
1	П1.3	19761	13311	17450	18100	16400
	П1.7	43727	36181	25912	24117	40380
	П1.11	38065	35799	41120	37259	56460
	П1.15	45576	48252	69464	83483	75390
	П1.17	23616	24690	13022	18757	20340
	П1.19	35994	29182	24078	20847	59940
	П1.22	29659	25688	21570	21366	30520
П1.24	42382	35271	36319	34384	19270	
2	П2.1	66696	52362	51907	41688	18460
	П2.2	46365	50073	41622	40428	69470
	П2.3	39865	38377	26775	24223	29400
	П2.4	39966	44335	32253	30838	25730
	П2.6	22259	21434	19168	19075	20480
	П2.7	57895	54262	40073	36960	16230
	П2.8	16466	19432	20783	26064	46470
	П2.9	119910	94100	50365	41647	74140
	П2.10	38137	36588	21963	20394	87590
3	П3.1	19761	13311	17450	18100	25650
	П3.2	43727	36181	25912	24117	40520
	П3.4	38065	35799	41120	37259	18370
Среднее значение модуля упругости, МПа		42726	38785	32579	31743	39461

Обсуждение и выводы

В ходе исследования физико-механических свойств горных пород была проведена комплексная оценка модуля упругости горных пород, отобранных на Баженовском месторождении. Для выявления различий в подходах определения деформационных свойств использовались наиболее репрезентативные результаты испытаний образцов перидотита: предел прочности на сжатие по пробе, в образцах и модуль упругости. Существенные различия в описанных процедурах оказывают влияние и вносят неоднозначность в интерпретацию закономерности изменений деформаций и прочности горной породы.

Метод ASTM D7012 выделился максимальным значением модуля упругости, в то время как DIN EN 14580 показал минимальные значения. ГОСТ 28985 оказался на промежуточной позиции. Полученные различия могут быть обусловлены особенностями методов измерения, их чувствительностью к структурным особенностям горных пород.

Для более точных и надежных результатов необходимы дополнительные исследования, направленные на уточнение границ линейного участка графика «напряжение-деформация» с использованием статистических методов анализа данных.

Полученные в ходе исследования данные могут служить основой для улучшения методологии оценки физико-механических свойств горных пород, что важно для промышленности строительства и горной деятельности.

Полученные в ходе исследования результаты являются первым шагом в более глубоком понимании физико-механических свойств горных пород. Однако для более полного и точного анализа необходимо проведение дополнительных исследований и уточнение некоторых аспектов:

- включение в исследование дополнительных образцов горных пород с различными геологическими характеристиками для более широкого покрытия;
- применение статистических методов для более точного определения границ линейного участка графика «напряжение-деформация» и уменьшения разброса результатов;
- доработка методик измерений, особенно в части учета структурных особенностей горных пород с целью повышения точности результатов;
- рассмотрение влияния различных условий (температура, влажность и др.) на физико-механические свойства горных пород;
- создание универсальной методологии, которая учитывает разнообразие геологических формаций и обеспечивает единый и более сопоставимый подход к оценке свойств.

Эти перспективы исследований будут способствовать более глубокому пониманию механических характеристик горных пород и разработке более точных методов их измерения, что имеет важное значение для инженерной практики и строительной отрасли.

Список литературы

1. Ломтадзе В.Д., 1990. *Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований*. Ленинград: Недра, 328 с.
2. Gercek H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 44, Issue 1, January, P. 1–13.
3. Yi Liu, Feng Dai, 2021. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 13, Issue 5, October, P. 1203–1230.
4. Shahverdilloo, M.R., Zare, S., 2021. A New Correlation to Predict Rock Mass Deformability Modulus Considering Loading Level of Dilatometer Tests. *Geotech Geol Eng*,

Volume 39, December, P. 5517–5528.

5. Hans J. Mueller, 2013. Measuring the elastic properties of natural rocks and mineral assemblages under Earth's deep crustal and mantle conditions. *Journal of Geodynamics*, Volume 71, November, P. 25–42.

6. Комарцов Н.М., Кулагина М.А., Рычков Б.А., 2018. О трактовке модуля упругости горных пород. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки*, Т. 22, № 3. С. 487–503.

7. Кулагина М.А., Рычков Б.А., Степанова Ю.Ю., 2019. Определение упругих констант горных пород. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки*, Т. 23, № 2, С. 284–303.

8. Сукнев С.В., Федоров С.П., 2014. Методы определения упругих свойств горных пород. *Наука и образование*, № 1, С. 18–24.

9. Винников В.А., Высотин Н.Г., 2018. Методика проведения испытаний по определению статического модуля упругости горных пород с использованием результатов лазерно-ультразвуковой спектроскопии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S1, С. 90–101.

10. ASTM D7012–10. *Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures*. West Conshohocken: ASTM International, 2010.

11. DIN EN 14580:2005. *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.

12. ГОСТ 28985–91. *Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии*. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004, 10 с.

13. Алексеев А.Ф., Грязнов О.Н., 2013. Физико-механические свойства метасоматитов серпентинитовой формации Баженовского месторождения хризотил-асбеста. *Инженерная геология*, № 4, С. 54–59.

14. Алексеев А.Ф., 2005. *Инженерная петрология гипербазитов Баженовского и Джетыгаринского месторождений хризотил-асбеста: специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение"*: дис. ... кандидата геолого-минералогических наук. Екатеринбург, 192 с.

References

1. Lomtadze V.D., 1990. Fiziko-mekhanicheskie svoistva gornykh porod. Metody laboratornykh issledovaniy [Physical and mechanical properties of rocks. Methods of laboratory research]. Leningrad: Nedra, 328 p.

2. Gercek H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 44, Issue 1, January, P. 1–13.

3. Yi Liu, Feng Dai, 2021. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 13, Issue 5, October, P. 1203–1230.

4. Shahverdilloo, M.R., Zare, S., 2021. A New Correlation to Predict Rock Mass Deformability Modulus Considering Loading Level of Dilatometer Tests. *Geotech Geol Eng*, Volume 39, December, P. 5517–5528.

5. Hans J. Mueller, 2013. Measuring the elastic properties of natural rocks and mineral assemblages under Earth's deep crustal and mantle conditions. *Journal of Geodynamics*, Volume 71, November, P. 25–42.

6. Komartsov N.M., Kulagina M.A., Rychkov B.A., 2018. O traktovke modulya uprugosti gornykh porod. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Physical and mechanical properties of rocks. Methods of laboratory research]. Ser. Fiz.-mat. nauki, Vol. 22, № 3. P. 487–503.

7. Kulagina M.A., Rychkov B.A., Stepanova Yu.Yu., 2019. Opredelenie uprugikh konstant gornykh porod [Determination of elastic constants of rocks]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univer-siteta. Ser. Fiz.-mat. nauki, Vol. 23, № 2, P. 284-303.
8. Suknev S.V., Fedorov S.P., 2014. Metody opredeleniya uprugikh svoystv gornykh porod [Methods for determining the elastic properties of rocks]. Nauka i obrazovanie, № 1, P. 18–24.
9. Vinnikov V.A., Vysotin N.G., 2018. Metodika provedeniya ispytaniy po opredeleniyu staticheskogo modulya uprugosti gornykh porod s ispol'zovaniem rezul'tatov lazerno-ul'trazvukovoi spektroskopii [Method of conducting tests to determine the static modulus of elasticity of rocks using the results of laser-ultrasonic spectroscopy]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S1, P. 90–101.
10. ASTM D7012–10. *Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures*. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
11. DIN EN 14580:2005. *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.
12. GOST 28985–91. Porody gornye. Metod opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik pri odnoosnom szhatii [Rocks are mountainous. A method for determining deformation characteristics in uniaxial compression]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004, 10 p.
13. Alekseev A.F., Gryaznov O.N., 2013. Fiziko-mekhanicheskie svoystva metasomatitov serpentinitovoi formatsii Bazhenovskogo mestorozhdeniya khrizotil-asbesta [Physical and mechanical properties of metasomatites of the serpentinite formation of the Bazhenovskoye chrysotile asbestos deposit]. Inzhenernaya geologiya, № 4, P. 54–59.
14. Alekseev A.F., 2005. Inzhenernaya petrologiya giperbazitov Bazhenovskogo i Dzhetygarinskogo mestorozhdenii khrizotil-asbesta [Engineering petrology of the hyperbasites of the Bazhenovskoye and Dzhetygarinskoye deposits of chrysotile asbestos]: spetsial'nost' 25.00.08 "Inzhenernaya geologiya, merzlotovedenie i gruntovedenie": dis. ... kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk. Ekaterinburg, 192 p.