



Анализ локальных механических характеристик горных пород методом инструментального индентирования в условиях циклического замораживания / оттаивания

А.И. Шихов✉, К.И. Доронин, О.Р. Красюк, А.В. Кондратьев

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ shikhov_ai@pers.spmi.ru

Резюме: Горные массивы в высокогорных или холодных регионах подвержены совокупному воздействию циклов замораживания-оттаивания и динамического нагружения смешанного типа, что создает серьезную угрозу безопасности и устойчивости геотехнических сооружений. Изменение физико-механических свойств и накопление трещин увеличивают риски геотехнических катастроф. Поэтому для снижения геоопасных явлений необходим анализ деформирования горных пород под действием циклических напряжений. В исследовании была проведена серия испытаний на образцах гранита методом инструментального индентирования в условиях циклического замораживания-оттаивания. Было изучено влияние циклов замораживания-оттаивания и концентрации рассолов на характеристики разрушения гранита, включая твердость и скорость распространения упругих волн. Результаты экспериментов показывают, что полученные методом инструментального индентирования данные коррелируют со стандартными методами, такими как ультразвуковой и контроль шероховатости поверхности. Показано, что для плотных гранитов на протяжении первых 50 циклов происходит накопление микроповреждений, которые на данной стадии не приводят к макроповреждениям. В свою очередь, на ранней стадии циклического замораживания-оттаивания увеличение концентрации рассолов поровой жидкости не приводит к интенсификации процессов разрушения.

Ключевые слова: циклические нагрузки, криолитозона, гранит, наноиндентирование, минеральная матрица, упругие волны, скорость распространения упругих волн, микроповреждения, макроповреждения

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRW-2026-0003 «Исследование процессов комплексного освоения недр Земли и глубокой переработки георесурсов».

Для цитирования: Шихов А.И., Доронин К.И., Красюк О.Р., Кондратьев А.В. Анализ локальных механических характеристик горных пород методом инструментального индентирования в условиях циклического замораживания / оттаивания. *Горная промышленность*. 2026;(4S):85–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-85-91>

Analysis of local mechanical properties of rocks using instrumented indentation under cyclic freezing–and–thawing conditions

A.I. Shikhov✉, K.I. Doronin, O.R. Krasnyuk, A.V. Kondrat'ev

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ shikhov_ai@pers.spmi.ru

Abstract: Rock masses in high-altitude or cold regions are subjected to the combined effects of the freeze–and–thaw cycles and mixed-mode dynamic loading, which pose a serious threat to the safety and stability of geotechnical structures. Changes in the physical and mechanical properties of rocks and accumulation of fractures increase the risks of geotechnical accidents. Therefore, it is necessary to analyze rock deformation under cyclic stresses in order to mitigate the geo-hazardous phenomena. A series of tests were carried out as part of this investigation using the instrumented indentation method under cyclic freezing–and–thawing conditions. The impact of the freeze–thaw cycles and brine concentration on the failure characteristics of granite was investigated including its hardness and elastic wave velocity. The experimental results show that the data obtained by instrumented indentation correlate with the conventional methods, such as ultrasonic testing and surface roughness control. Moreover, it is shown that micro-damages in dense granites accumulate during the first 50 cycles, which at this stage does not result in macro-damages. In turn, an increase in the pore brine concentration does not intensify the failure processes at the early stage of cyclic freezing–and–thawing.



Keywords: cyclic loads, cryolithozone, granite, nanoindentation, mineral matrix, elastic waves, propagation velocity of elastic waves, micro-damages, macro-damages

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Study of the processes of integrated development of the Earth's interior and deep processing of geological resources, project No. FSRW-2026-0003).

For citation: Shikhov A.I., Doronin K.I., Krasyuk O.R., Kondrat'ev A.V. Analysis of local mechanical properties of rocks using instrumented indentation under cyclic freezing-and-thawing conditions. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):85–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-85-91>

Введение

Значительная часть топливно-энергетического комплекса и минерально-сырьевой базы расположена в зоне распространения вечномёрзлых грунтов. Потепление климата расширяет области сезонного оттаивания, что вместе с техногенной нагрузкой активизирует геокриологические процессы [1–3]. Циклический фазовый переход воды порождает давление морозного пучения, разрушающее минеральную матрицу породы. Изменение физико-механических свойств и накопление трещин увеличивают риски геотехнических катастроф [4–8]. Поэтому анализ деформирования горных пород под действием циклических напряжений, вызванных морозным пучением, необходим для снижения геоопасных явлений.

Механизмы разрушения при циклическом замораживании-оттаивании (З-О) обычно разделяют на две группы [9]: напряжения от изменения объёма воды в результате фазового перехода; механизм, описываемый капиллярной теорией и теорией сегрегации льда. Накопление микротрещин под действием механических и термических напряжений носит нелинейный характер [10; 11] и ведёт к изменению физико-механических характеристик, росту анизотропии и зависимости прочности от ориентации трещин [12; 13].

Для оценки поврежденности применялись ультразвуковые [14], разрушающие [15; 16] и микроструктурные методы (КТ, ЯМР, СЭМ) [17–21]. Ультразвук чувствителен к появлению трещин, но слабо различает их количество и тип. Разрушающие испытания дают интегральную характеристику породы, не позволяя анализировать механизмы на микроуровне. Методы КТ, ЯМР и СЭМ выявляют эволюцию порового пространства, однако изменение структуры пор – лишь следствие деградации минеральной матрицы. Ключевым параметром, определяющим межатомное взаимодействие, является модуль упругости; его измерение на уровне отдельных минералов позволило бы описать механизм разрушения горных пород.

Такую возможность даёт метод инструментального наноиндентирования [22; 23], активно применяемый для геоматериалов [24–26]. С его помощью установлены различия твёрдости и модуля упругости кварца и полевых шпатов, зависимость свойств от глубины вдавливания, механизмы ползучести и особенности разрушения минералов [27].

Метод наноиндентирования широко применяется в настоящее время и демонстрирует сходимость результатов с результатами, полученными общепризнанными методами, такими как акустическая эмиссия [28] и одноосное и двухосное сжатие [29; 30]. Поэтому в данной работе метод инструментального наноиндентирования использовался для исследования микромеханических характеристик минералов породной матрицы гранита, подвергнутого циклическому З-О.

Теоретические предпосылки применения метода наноиндентирования

Описание деградации механических параметров минералов

Для прогнозирования разрушения хрупких материалов, таких как горные породы, наряду с критериями, основанными на анализе энергетических параметров разрушения, например, критерием максимальной скорости высвобождения энергии (MERR) [31] или критерием средней плотности энергии деформации (ASED) [32], используются критерии, основанные на анализе максимального касательного напряжения (MTS). Математически данный критерий выглядит следующим образом:

$$\tau_{\theta\theta} > \tau_{кр}. \quad (1)$$

В общем случае величину касательных напряжений можно выразить из уравнений теории упругости:

$$\tau = G\gamma = \gamma \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \right], \quad (2)$$

где G – модуль сдвига; γ – сдвиговые деформации; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Модуль упругости E является мерой сил межатомных связей, действующих в кристаллической решетке:

$$E = \frac{N}{S} \beta r_0, \quad (3)$$

где r_0 – расстояние между атомными плоскостями; β – жесткость связи; N – число частиц, находящихся в атомном слое; S – площадь атомного слоя.

Пластические деформации кристаллов в общем виде могут быть описаны дислокационным механизмом скольжения. При этом величина касательного напряжения, необходимого для сдвига с места дислокации, определяется из выражения:

$$\tau_{ст} = \frac{2G e^{\frac{-2\pi r_0}{d(1-\mu)}}}{1-\mu}. \quad (4)$$

С учетом выражений (2) и (3) выражение (4) примет следующий вид:

$$\tau_{ст} = \frac{2 \left[\frac{N}{S} \beta r_0 \right]^{\frac{-2\pi r_0}{d(1-\mu)}}}{1-\mu}. \quad (5)$$

При достижении касательных напряжений, вызванных действием температурного градиента и циклическим фазовым переходом воды, величины $\tau_{ст}$ происходит движение дислокаций. Кроме того, механизм релаксации цикличе-

ских напряжений является источником генерации новых дислокаций или так называемым источником Франка–Рида. В свою очередь, генерация и движение скоплений дислокаций приводят к изменению параметров β и r_0 в выражениях (3) и (5), что в общем виде объясняет деградацию механических характеристик минеральной составляющей матрицы горной породы на микроуровне.

Определение механических характеристик методом наноиндентирования

Метод индентирования заключается в вдавливании в образец индентора под контролируемой нагрузкой (рис. 1, а), где результатом измерения является диаграмма «нагрузка P – глубина h » – $P(h)$ (рис. 1, б).

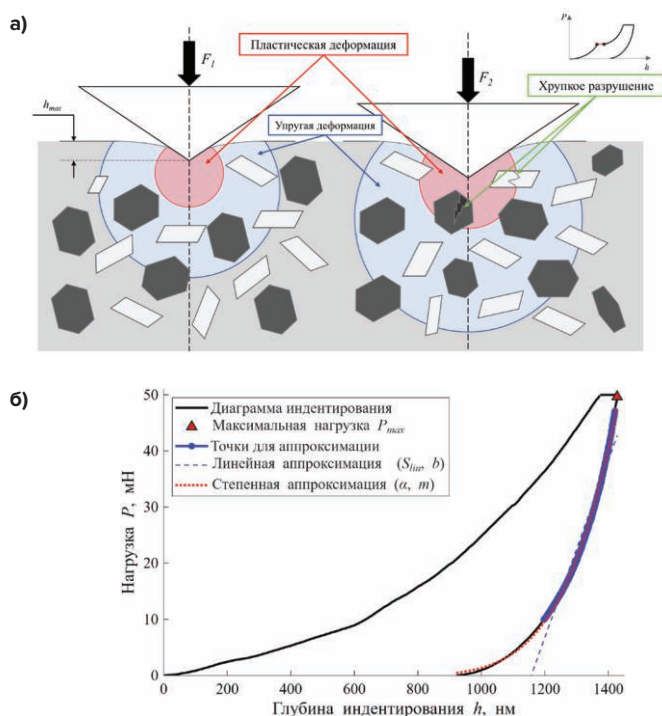


Рис. 1
Процесс индентирования:
а – схема внедрения индентора при различных нагрузках F ;
б – типичная диаграмма индентирования $P(h)$ при аппроксимации этапа разгрузки

Fig. 1
The indentation process:
а – a schematic drawing of the indenter penetration under different loads F ;
б – a typical indentation diagram $P(h)$ when approximating the unloading stage

Для извлечения механических характеристик из первичных диаграмм «нагрузка P – глубина h » – $P(h)$ использовался метод Оливера–Фарра [33]. Ключевым этапом является анализ кривой разгрузки, которая описывается степенной зависимостью:

$$P = \alpha(h - h_f)^m, \quad (6)$$

где α – постоянная; h_f – остаточная глубина после полной разгрузки; m – показатель степени, зависящий от формы индентора (для Берковича $m \approx 1,5$).

Контактная жесткость S , определяемая как производная нагрузки по глубине в точке максимума ($P_{\max}$, $h_{\max}$):

$$S = \left. \frac{dP}{dh} \right|_{h_{\max}} = \alpha m (h - h_f)^{m-1}. \quad (7)$$

Контактная глубина:

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S}, \quad (8)$$

где $\varepsilon = 0,75$ для пирамидального индентора.

Площадь проекции контакта A для идеального наконечника Берковича связана с h_c :

$$A_c = C_0 h_c^2 \quad (C_0 = 24,5). \quad (9)$$

Твердость НТ и приведенный модуль упругости E_r рассчитываются непосредственно из кривой разгрузки:

$$H_{IT} = \frac{P_{\max}}{A_c}, \quad (10)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}}. \quad (11)$$

Связь между приведенным модулем и модулем упругости образца $E_{IT} = E_s$ описывается выражением, учитывающим упругую податливость индентора:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (12)$$

где ν_s – коэффициент Пуассона образца (для гранита принят равным $\nu_s = 0,25$).

В настоящей работе применялась степенная аппроксимация: строгое описание этапа разгрузки степенной функцией по выражению (1). Неизвестные параметры α , h_f и m определяются нелинейной регрессией выбранного участка кривой (20...95% от $P_{\max}$). Начальные приближения: $m = 1,5$, $h_f = \min(1 \text{ нм})$, $\alpha = P_{\max}(h_{\max} - h_f)^m$. После нахождения параметров жесткость S рассчитывается в соответствии с выражением (7). Такой подход соответствует оригинальной методологии Оливера–Фарра [33].

Материалы и методы

Исследования проводились на образцах гранита. Петрографический анализ породы гранита обычно показывает, что основными пороодообразующими минералами являются кварц (≈ 30 – 35%), полевой шпат (ортоклаз и плагиоклаз ≈ 55 – 60%) и биотит (≈ 5 – 10%). Средний размер зерен составляет 1–3 мм. Перед испытаниями образцы были распилены на кубы размером 50х30х30 мм (рис. 2), поверхность которых последовательно шлифовалась и полировалась алмазными пастами до шероховатости $Ra < 100 \text{ нм}$. Циклическое 3-О проводилось в климатической камере по режиму: -25°C (8 ч) / $+25^\circ\text{C}$ (8 ч) с числом циклов от 0 до 50.

Измерения выполнялись на приборе «НаноСкан 4D+» (ФГБНУ «ТИСНУМ», Россия) трехгранным алмазным ин-

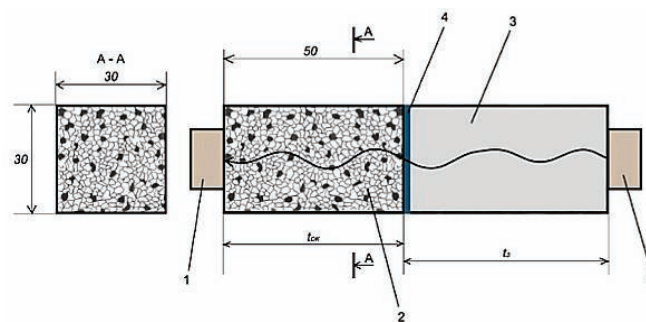


Рис. 2
Схема измерения скорости распространения продольной волны: 1 – пьезоэлектрический преобразователь; 2 – объект контроля; 3 – акустическая задержка; 4 – контактная жидкость

Fig. 2
A schematic drawing showing measurement of the longitudinal wave propagation velocity: 1 – piezoelectric transducer; 2 – test object; 3 – acoustic delay line; 4 – coupling fluid

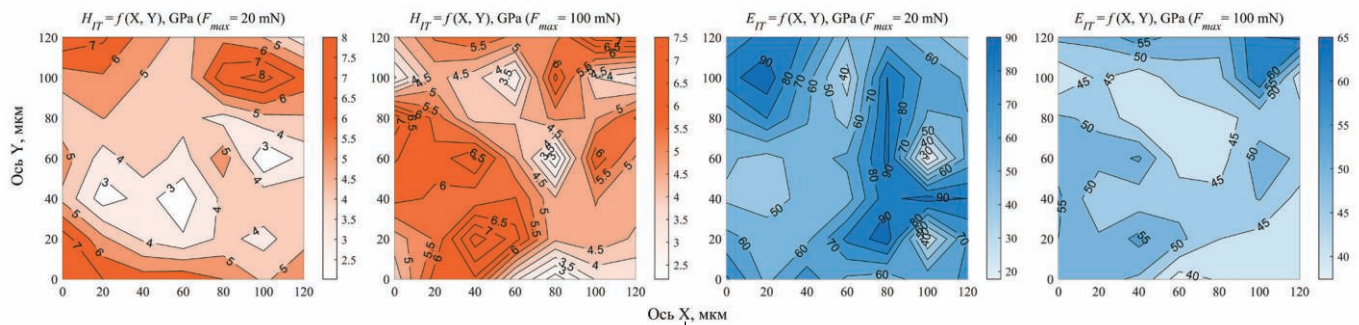


Рис. 3
Карты распределения свойств гранита в области 120×120 мкм

Fig. 3
Distribution heatmaps of granite properties within a 120×120 μm zone

дентором Берковича [34]. Параметры индентора: модуль упругости $E = 1141$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,07$, геометрическая константа $\varepsilon = 0,75$, коэффициент формы площади C_0 корректировался при калибровке функции формы индентора на стандартном образце – плавленом кварце. Нагрузка подбиралась из диапазона 10...100 мН, чтобы глубина внедрения составляла 200...1500 нм.

Необходимо отметить, что при измерении свойств многофазных материалов критически важно подобрать нагрузку, при которой свойства будут оцениваться с точки зрения интегральности и локальности индентирования (см. рис. 1). При малых нагрузках ($F_1 < F_2$) к образцу предъявляются высокие требования по шероховатости, т.к. морфология самого образца будет вносить больше неопределенности в результаты измерений. В случае высокой нагрузки F_2 характер взаимодействия индентора и поверхности будет иметь более интегральный характер. В случае если в область пластической деформации будет попадать более твердая фаза, возможно возникновение локальной трещины, которая может исказить диаграмму индентирования (эффект «pop-in»).

Каждое измерение включало три этапа: нагружение с постоянной скоростью в течение 10 с, выдержку 10 с для снижения влияния теплового дрейфа и разгрузку. Для индентирования выбраны две основные фазы: биотит и кварц, так как они имеют наиболее различные свойства с точки зрения соотношения упругопластических характеристик. На каждом структурном элементе выполнялось не менее 10 измерений, расположенных в виде регулярной сетки с шагом 50 мкм, что исключало взаимное влияние соседних отпечатков.

Также для подтверждения достоверности полученных результатов были проведены измерения скорости распространения продольной волны на каждом контрольном цикле 3-О. Данный метод был выбран в качестве контрольного, так как является стандартизованным и широко применяемым для оценки морозостойкости строительных материалов. Схема прозвучивания показана на рис. 2. Измерения выполнялись прибором Пульсар-2.1 на частоте 60 кГц. Так как для проведения измерений методом наноиндентирования размеры образцов были ограничены, база прозвучивания являлась короткой по отношению к длине ультразвуковой волны. Поэтому измерения выполнялись через акустическую задержку, в роли которой использовано оргстекло.

Скорость распространения продольной волны вычислялась следующим образом:

$$V = \frac{L}{t_0 - t_3}, \quad (13)$$

где t_0 – общее время распространения волны, измеренное прибором; t_3 – время распространения волны в акустической задержке; L – длина образца гранита.

Результаты

В первичных испытаниях подбиралась нагрузка для серий измерений. Для этого производилось тестовое испытание при линейно возрастающей нагрузке от 1 мН до 100 мН. Также произведены испытания по определению интегральных свойств в рамках поверхности 120x120 мкм (рис. 3). Разброс значений твердости H_{IT} и модуля упругости E_{IT} для нагрузки $P_{max} = 20$ мН составил 30,4 и 31,9% соответственно. Для нагрузки $P_{max} = 100$ мН: 27,4 и 11,6% соответственно. Также при нагрузке $P_{max} = 100$ мН наблюдается пространственная корреляция между упругопластическими характеристиками в рамках исследуемой области. Уменьшение разброса свойств при увеличении нагрузки в первую очередь связано с уменьшением вклада шероховатости, которая неравномерно распределена по образцу в диапазоне $Ra = 0,3...1,2$ мкм, что также подтверждается результатами. Данное значение не соответствует требованиям для выбора глубины индентирования, однако регламентирующего документа для измерений механических свойств горных пород методами индентирования не существует. Ряд исследований допускают проведение измерений с уровнем шероховатости, выше указанного в ISO 14577-1:2015¹ и определенного в данном исследовании, при этом предполагается введение поправочных коэффициентов или использование индентора другой формы [35].

Результаты измерений показывают, что с увеличением количества циклов 3-О твердость кварца и биотита практически не изменяется (рис. 4). Отметим также, что увеличение концентрации поровых рассолов не приводит к изменению динамики деградации минеральной матрицы. Статистический анализ полученных результатов показывает, что величина коэффициента вариации составляет порядка 20–30%. Данный факт может свидетельствовать о высокой неоднородности исследуемых материалов на наноуровне, а также о наличии влияющих на результат измерения факторов, которые оказывают систематическое влияние. Одним из таких факторов, как было сказано выше, является шероховатость поверхности.

При этом стоит отметить, что независимо от концентрации рассола и типа минерала стандартное отклонение (СКО) результатов измерения растет с увеличением количества циклов 3-О (рис. 4, б). Увеличение СКО демонстрирует увеличение вклада влияющих параметров в результат

¹ ISO 14577-1:2015. Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters. Part 1: Test Method. Geneva: ISO; 2015. Available at: <https://www.iso.org/standard/56626.html> (accessed: 13.06.2024).

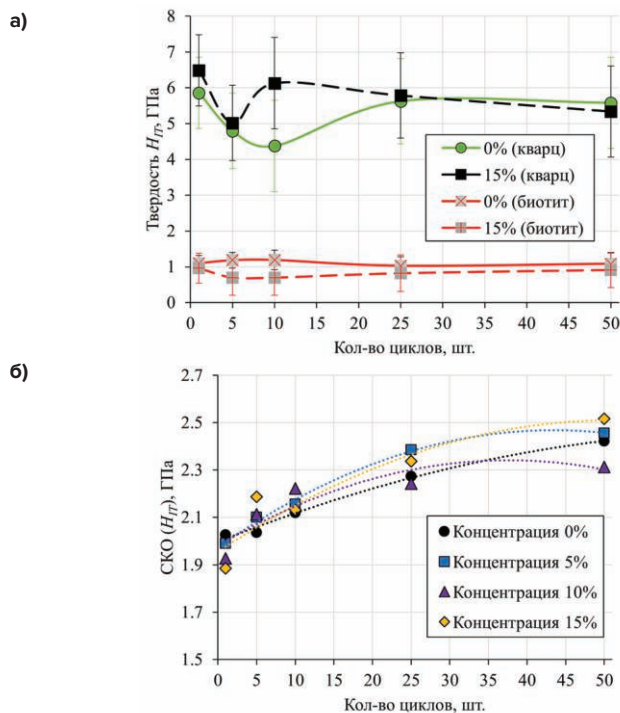


Рис. 4
Результаты измерений твердости методом наноиндентирования: а – твердость различных компонентов; б – стандартное отклонение измерений твердости фазы кварца

Fig. 4
Results of hardness measurements using the nanoindentation method: а – hardness of various components; б – standard deviation in quartz hardness measurement

измерения. Причем, как показано в работе [36], на ранних стадиях, когда происходит накопление микрповреждений, шероховатость поверхности растет, после достижения критического уровня накопленных повреждений происходит частичное разрушение микроструктурного элемента минеральной матрицы. Как можно видеть, при достижении максимального количества циклов З-О, в данном случае – 50, СКО возрастает. Исходя из чего можно сделать вывод, что количество циклов З-О, которым был подвержен гранит в данной работе, недостаточно для доведения данных образцов до деградации. Данный вывод является физическим обоснованием для использования СКО для оценки степени поврежденности минеральной матрицы гранита при использовании метода наноиндентирования.

Скорость распространения продольной волны с увеличением количества циклов З-О также не изменяется (рис. 5). Следовательно, данные результаты являются подтвержде-

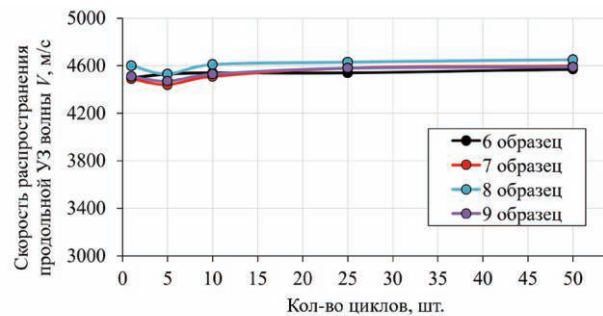


Рис. 5
Результаты измерений скорости распространения продольной волны

Fig. 5
Measurement results of the longitudinal wave propagation velocities

нием результатов, полученных методом наноиндентирования. В данном случае отсутствие изменений скорости распространения продольной волны с увеличением количества циклов З-О указывает на отсутствие изменений в образцах гранита на макроуровне, что подтверждается полученными результатами измерения свойств минералов на микроуровне.

Выводы

Полученные данные демонстрируют, что метод инструментального индентирования чувствителен к изменениям микроструктуры, вызванных циклическим З-О, и может использоваться для количественной оценки степени деградации минеральных составляющих горных пород. Статистический анализ экспериментальных данных показал:

1. Анализ пространственного распределения свойств выявил наличие корреляции между твердостью и модулем упругости в пределах исследованной области размером 120×120 мкм, что подтверждает возможность идентификации минеральных фаз по комплексу механических характеристик без привлечения дополнительных методов микроскопии.
2. На ранних стадиях циклического З-О деградация механических свойств минералов не выявлена, при этом установлена высокая степень неоднородности исследуемых минералов.
3. Меры рассеивания результатов измерения твердости свидетельствуют о наличии изменения свойств и накоплении микрповреждений даже на ранних стадиях циклического З-О.
4. Увеличение концентрации поровых рассолов не приводит к ускоренной деградации минеральной составляющей гранита на ранних стадиях циклического З-О.

Список литературы / References

1. Хохлов С.В., Соколов С.Т., Виноградов Ю.И., Френкель И.Б. Проведение промышленных взрывов вблизи газопроводов. *Записки Горного института*. 2021;247:48–56. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.6>
khokhlov S.V., Sokolov S.T., Vinogradov Y.I., Frenkel I.B. Conducting industrial explosions near gas pipelines. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:48–56. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.6>
2. Petrakov D.G., Karmanskiy D.A. Comparison of analytical and experimental methods for determining dependency of permeability of clayey sandstones on effective pressure. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025;38(11):2502–2510. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.11b.03>
3. Брын М.Я., Мустафин М.Г., Баширова Д.Р., Васильев Б.Ю. Исследования точности построения цифровых моделей рельефа техногенных массивов по данным спутниковых определений координат. *Записки Горного института*. 2025;271:95–107. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16310> (дата обращения: 19.03.2026).
Bryn M.Y., Mustafin M.G., Bashirova D.R., Vasilev B.Y. Investigation of the accuracy of constructing digital elevation models of technogenic massifs based on satellite coordinate determinations. *Journal of Mining Institute*. 2025;271:95–107. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16310> (accessed: 19.03.2026).



4. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О.В. и др. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне. *Записки Горного института*. 2023;263:742–756. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16277> (дата обращения: 19.03.2026).
Brushkov A.V., Alekseev A.G., Badina S.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A., Zhdaneev O.V. et al. Structure maintenance experience and the need to control the soils thermal regime in permafrost areas. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:742–756. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16277> (accessed: 19.03.2026).
5. Tien D.L., Trung T.V., Anh S.D., Babyr N.V. Ground pressure and methods to enhance roof stability in mechanized coal mining. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2026;39(4):862–869. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.04a.05>
6. Phuc L.Q., Linh N.K., Babyr N.V., Thang N.V. Stress environment and roof support needs for roadways ahead of the coal face: Case study from Ha Lam coal mine. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025;15(4):270–284. <https://doi.org/10.46698/o0885-5581-1938-j>
7. Gustov V., Pshenin V., Zakirova G. Substantiation of solutions for enhancing the environmental safety level of a marine oil terminal under conditions of high intensification of technological processes. *Frontiers in Marine Science*. 2026;13:1849663. <https://doi.org/10.3389/fmars.2026.1849663>
8. Khanh D.V., Anh H.P., Hanh N.T.H., Grigoriev E.V. An integrated GIS-Markov chain-logistic regression approach to modeling land-use dynamics in six communes of an Giang province. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2027;40(2):414–425. <https://doi.org/10.5829/ije.2027.40.02b.07>
9. Zhang Q., Liu Y., Dai F. A frost heave pressure model for fractured rocks subjected to repeated freeze-thaw deterioration. *Engineering Geology*. 2024;337:107587. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107587>
10. Babyr N.V., Kuziev D.A., Szankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 27.03.2026).
11. Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M.J. Freeze–thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology*. 2015;113:40–51. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.01.008>
12. Fujii Y., Takemura T., Takahashi M., Lin W. Surface features of uniaxial tensile fractures and their relation to rock anisotropy in Inada granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007;44(1):98–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.05.001>
13. Weng L., Wu Z., Taheri A., Liu Q., Lu H. Deterioration of dynamic mechanical properties of granite due to freeze-thaw weathering: Considering the effects of moisture conditions. *Cold Regions Science and Technology*. 2020;176:103092. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103092>
14. Zhang W., Chai C., Chen H., Zhang S., Du H., Wang J. et al. Freeze-thaw damage differences in saturated limestone: Macro-meso-micro response and mechanism driven by initial properties. *Cold Regions Science and Technology*. 2026;245:104849. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2026.104849>
15. Zhao Y., Liu B., Wang C., Bi J., Yang Z. Study on deterioration mechanism of granite with a natural single weak surface after freeze-thaw treatment. *Cold Regions Science and Technology*. 2024;218:104079. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104079>
16. Tan X., Chen W., Yang J., Cao J. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 2011;68(3):130–138. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.05.007>
17. Feng Q., Hou S., Liu W., Zhang S., Li W., Tian M. Study on the simulation method and mesoscopic characteristics of rock freeze-thaw damage. *Computers and Geotechnics*. 2023;153:105038. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105038>
18. Maji V., Murton J.B. Micro-computed tomography imaging and probabilistic modelling of rock fracture by freeze–thaw. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020;45(3):666–680. <https://doi.org/10.1002/esp.4764>
19. Li J., Kaunda R.B., Zhou K. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;154:133–141. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.06.015>
20. Gong Y., Song J., Wu S., Zhang Y. Evolution of pore structure and analysis of freeze damage in granite during cyclic freeze-thaw using NMR technique. *Engineering Geology*. 2024;335:107545. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107545>
21. Zhang J., Wang G., Liu H., Yang M. Study on the evolution of microscopic pore structure of sandstone under freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 2024;217:104018. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104018>
22. Lecomte J.-S., Schuman C. Nanoindentation analysis of Bohus granite: Macroscopic properties and phase-specific mechanical behavior. *Construction and Building Materials*. 2026;511:145169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145169>
23. Doronin K.I., Gogolinskiy K.V., Umanskii A.S. Influence of strain hardening on the results of calculating the material mechanical properties via the instrumented indentation test. *International Review on Modelling and Simulations*. 2025;18(5):340–349. <https://doi.org/10.15866/iremos.v18i5.26428>
24. Liu X.-Y., Xu D.-P., Li S.-J., Qiu S.-L., Jiang Q. An insight into the mechanical and fracture characterization of minerals and mineral interfaces in granite using nanoindentation and micro X-Ray computed tomography. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023;56(5):3359–3375. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03221-6>
25. Ma Z., Zhang C., Gamage R.P., Zhang G. Uncovering the creep deformation mechanism of rock-forming minerals using nanoindentation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022;32(2):283–294. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.11.010>



26. Xie Q., Tian X., Zeng Y., Liu X., Wang L. Study on the influence of indentation depths on the fracture characterization and acoustic emission characteristics of minerals in granite using nanoindentation. *Construction and Building Materials*. 2024;450:138516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138516>
27. Mustafaev A.S., Grabovskiy A.Y., Sukhomlinov V.S., Shtoda E.V. A universal triode-based plasma device with controllable electrokinetic characteristics. *Journal of Applied Physics*. 2026;139(15):153302. <https://doi.org/10.1063/5.0323633>
28. Lei M., Dang F.-N., Xue H., Xing J., Ding W. Study on the effect of nanoindentation test method on micromechanical properties of granite minerals. *Geofluids*. 2022;2022:5834979. <https://doi.org/10.1155/2022/5834979>
29. Magnenet V., Auvray C., Francius G., Giraud A. Determination of the matrix indentation modulus of Meuse / Haute-Marne argillite. *Applied Clay Science*. 2011;52(3):266–269. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.03.001>
30. Syasko V., Musikhin A., Gnivush I., Stepanova M., Vinogradova A. Rolled waterproofing coating delamination detection by high-voltage testing. *Coatings*. 2026;16(6):648. <https://doi.org/10.3390/coatings16060648>
31. Cui Z., Dai F., Liu Y., Zhang B., Wei M., Zhang Q. Dynamic fracture properties and criterion of cyclic freeze-thaw treated granite subjected to mixed-mode loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024;16(12):4971–4989. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.019>
32. Berto F., Lazzarin P. A review of the volume-based strain energy density approach applied to V-notches and welded structures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2009;52(3):183–194. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2009.10.001>
33. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*. 2004;19(1):3–20. <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
34. Усеинов А., Решетов В., Маслеников И., Русаков А., Гладких Е., Беспалов В., Логинов Б. Исследование свойств тонких покрытий в режиме динамического механического анализа с помощью сканирующего нанотвердомера «Нано-Скан-4D». *Наноиндустрия*. 2016;(1):80–87. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2016.63.1.80.87>
Useinov A., Reshetov V., Maslenikov I., Rusakov A., Gladkih E., Bepalov V., Loginov B. Study of properties of thin films in dynamic mechanical analysis mode using NanoScan-4D scanning nano-hardness tester. *Nanoindustry*. 2016;(1):80–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2016.63.1.80.87>
35. Kravchuk K.S., Kostsova A.A., Kondratskiy D.Y. Reducing the influence of the surface roughness on the hardness measurements using instrumented indentation text. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(12):26128–26132. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.042>
36. Gu Q., Huang Z., Zhao K., Zhong W., Liu L., Li X. et al. Effects of high temperature and thermal cycles on fracture surface's roughness of granite: An insight on 3D morphology. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025;17(2):810–826. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.04.025>

Информация об авторах

Шихов Александр Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии, приборостроения и управления качеством, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8213-0989>; e-mail: shikhov_ai@pers.spmi.ru

Доронин Кирилл Игоревич – аспирант кафедры метрологии, приборостроения и управления качеством, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0001-3811-8843>

Красюк Оксана Романовна – студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Кондратьев Артем Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии, приборостроения и управления качеством, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8676-4092>

Information about the authors

Aleksander I. Shikhov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Metrology, Instrumentation and Quality Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8213-0989>; e-mail: shikhov_ai@pers.spmi.ru

Kirill I. Doronin – Postgraduate Student, Department of Metrology, Instrumentation and Quality Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0001-3811-8843>

Oksana R. Krasnyuk – Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

Artem V. Kondrat'ev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Metrology, Instrumentation and Quality Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8676-4092>

Article info

Received: 31.05.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 18.08.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 31.05.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 18.08.2026