Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-258-264

Исследование изменения физико-механических свойств скальных горных пород и их трещиноватости с глубиной на примере Хибинского массива

Н.Н. Кузнецов, М.С. Кулькова✉
Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ m.kulkova@ksc.ru

Резюме: С увеличением масштабов ведения горных работ все более актуальным становится вопрос о закономерностях изменения физико-механических свойств горных пород и параметров их трещиноватости с глубиной залегания. Имеющаяся в литературных источниках информация не позволяет сформировать четкое представление об изменении этих характеристик, что обусловливает необходимость проведения натурных и лабораторных исследований в процессе отработки месторождений. В работе приведены результаты комплексного анализа структурной трещиноватости и физико-механических свойств кернового материала, отобранного из субвертикальной скважины на одном из месторождений Хибинского массива. В интервале от 340,0 до 841,0 м от дневной поверхности определены индекс качества массива, линейная частота трещин, плотность четырех типов скальных пород и пределы их прочности при одноосном сжатии и растяжении, выявлены разломные структуры и зоны дискования керна. Показано, как изменяются физико-механические свойства исследуемых пород и их трещиноватость с увеличением глубины залегания.

Ключевые слова: скальные горные породы, глубина залегания, физико-механические свойства, трещиноватость, прочность, плотность.

Благодарности: Авторы выражают благодарность ведущему технологу лаборатории №26.2 отдела геомеханики Горного института Кольского научного центра РАН Ольге Николаевне Целовальниковой за совместное участие в геотехническом описании керна исследуемой скважины и отборе проб для определения физико-механических свойств горных пород.

Для цитирования: Кузнецов Н.Н., Кулькова М.С. Исследование изменения физико-механических свойств скальных горных пород и их трещиноватости с глубиной на примере Хибинского массива. *Горная промышленность*. 2026;(5):258–264. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-258-264

Study of change in the physical-mechanical properties of hard rocks and their fracturing with depth using the example of the Khibiny massif

N.N. Kuznetcov, M.S. Kulkova✉
Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ m.kulkova@ksc.ru

Abstract: As the mining operations expand, the issue of the change patterns in the physical and mechanical properties of rocks and parameters of their fracturing with burial depth is becoming increasingly relevant. Information available in the published literature does not provide a clear understanding of how these characteristics vary, thereby explaining the need for field and laboratory investigations during the deposit development. This paper presents the results of a comprehensive analysis of structural fracturing and physical and mechanical properties of the core material taken from a subvertical borehole at one of the deposits within the Khibiny massif. In the interval from 340.0 to 841.0 m below the ground surface, the rock mass quality index, linear fracture frequency, density of four rock types and their uniaxial compressive and tensile strength were determined; fault structures and core discing zones were also identified. It is shown how the physical-mechanical properties of the investigated rocks and their fracturing vary with increasing burial depth.

Keywords: hard rocks, burial depth, physical-mechanical properties, fracturing, strength, density.
Acknowledgements: The authors express their gratitude to Olga Nikolaevna Tselovalnikova, Lead Technologist at Laboratory No. 26.2 of the Geomechanics Department at the Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, for her collaboration in the geotechnical description of the core from the test borehole and in collection of samples to identify the physical and mechanical properties of the rocks.
For citation: Kuznetcov N.N., Kulkova M.S. Study of change in the physical-mechanical properties of hard rocks and their fracturing with depth using the example of the Khibiny massif. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):258–264. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-258-264

Введение

Развитие крупномасштабных горных работ в современных условиях неизбежно связано с вовлечением в разработку всё более глубоких горизонтов. В этой связи возрастает актуальность исследований, направленных на изучение закономерностей изменения физико-механических свойств горных пород с глубиной. Данная проблематика неразрывно связана с задачами оценки устойчивости горных выработок, определения напряжённо-деформированного состояния породных массивов, прогнозирования динамических проявлений горного давления, а также обоснования рациональных параметров крепи. Наряду с этим при определении физико-механических свойств массива пород существенную роль играет учёт его качественных характеристик, в частности, количественная оценка степени его структурной нарушенности (трещиноватости).

Анализируя имеющуюся в литературных источниках информацию об изменении физико-механических свойств пород с глубиной, можно отметить следующие особенности. В работе [1] на примере Сорского карьера установлено, что с увеличением глубины от 0 до 500 м объемный вес пород увеличивается, сцепление возрастает, угол внутреннего трения почти не меняется [1]. В работах [2; 3] выявлено, что для осадочных пород с увеличением глубины их залегания значения модуля упругости, предела прочности при сжатии и плотности нелинейно увеличиваются, тогда как значения коэффициента Пуассона уменьшаются. Схожие результаты, показывающие возрастание с глубиной залегания значений прочности и модуля упругости, получены в ходе испытаний образцов доломита [4] и песчаника [5]. Для ряда месторождений на образцах гранита установлено, что с возрастанием глубины увеличиваются их прочностные и деформационные характеристики [6–8]. При этом в интервале от 950 до 1250 м наоборот происходит уменьшение значений этих характеристик, что связывают с уменьшением содержания кварца в граните [7]. Для образцов угля на примере одной из шахт Китая выявлено, что на глубине от 300 до 1050 м происходит постепенное увеличение значений модуля упругости, а прочность, коэффициент Пуассона и объемная деформация образцов увеличиваются нелинейно [9]. На примере свинцово-цинкового месторождения показано, что с возрастанием глубины от 900 до 1200 м увеличиваются значения плотности пород, прочности при одноосном сжатии и растяжении, модуля упругости, тогда как значения коэффициента Пуассона изначально увеличиваются, а затем уменьшаются [10]. На основе этой информации можно отметить, что для ряда месторождений характерно возрастание плотностных, прочностных и деформационных свойств пород с увеличением глубины их залегания. Тем не менее имеются и противоположные результаты, показывающие уменьшение значений этих свойств с глубиной [2; 7; 10].

Что касается трещиноватости массива пород, то на примере Ковдорского апатит-магнетитового месторождения [11] и Удерейского золото-сурьмяного месторождения [12] показано, что интенсивность трещиноватости уменьшается с увеличением глубины залегания пород. Также на основе анализа образцов керна отмечается, что с глубиной может происходить уменьшение микротрещиноватости пород [13]. Это может быть связано с выходом из приповерхностной зоны разгрузки и выветривания, которая зачастую характеризуется повышенной интенсивностью трещиноватости [14]. Однако на примере Горевского свинцово-цинкового месторождения выявлено, что в пределах карьера на глубине порядка 200–300 м и ниже изменения трещиноватости с глубиной не прослеживается [15]. В работе [16] приводится информация, согласно которой с глубиной изменяется не только количество трещин, но и их направление. Следовательно, имеющаяся информация не позволяет составить однозначного представления о характере изменения трещиноватости массивов пород с глубиной.

Целью настоящей работы является исследование особенностей изменения физико-механических свойств горных пород и их трещиноватости с глубиной их залегания на примере Хибинского массива.

Материалы и методы

Объектом исследования в настоящей работе является массив горных пород. На примере одного из апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива выполнен анализ изменения физико-механических свойств пород, а также их трещиноватости по мере увеличения глубины залегания. С этой целью изучен керн субвертикальной скважины протяжённостью 501,0 м, заложенной на глубине 340,0 м от дневной поверхности. Диаметр бурения соответствовал NQ (75,7 мм), диаметр извлечённого керна составил 47,5 мм, керн не ориентирован.

В пределах исследуемого интервала отбора керна 340,0–841,0 м (далее по тексту – 0,0–501,0 м относительно устья скважины) выделены четыре литологических типа скальных пород (рис. 1): ювит среднезернистый массивный (0,0–28,5 м), рисчоррит среднезернистый массивный

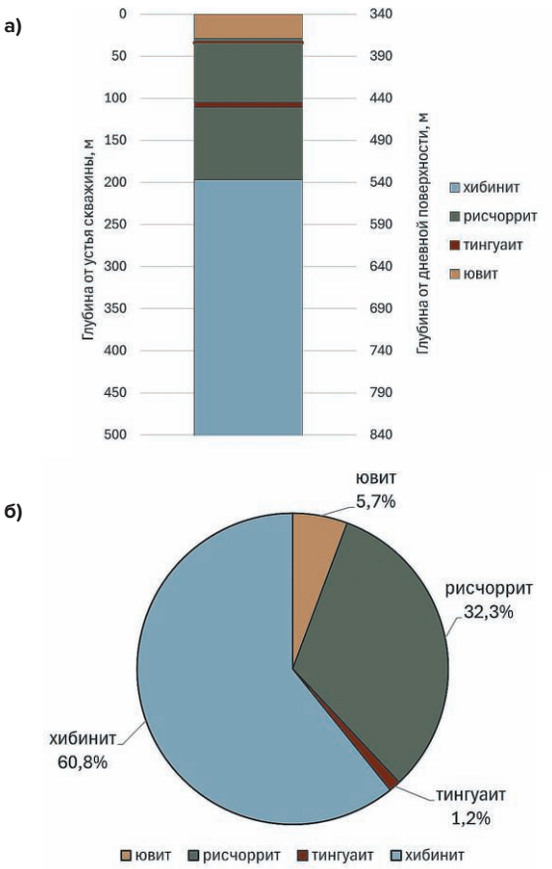


Рис. 1
Характеристика керна субвертикальной скважины апатит-нефелинового месторождения Хибинского массива:
а – литологическая колонка скважины;
б – литологический состав скважины

Fig. 1
A description of the core from the subvertical borehole in the apatite-nepheline deposits of the Khibiny massif:
a – a lithological column of the borehole;
б – lithological composition of the borehole

(28,5–104,9 и 110,6–195,9 м), дайка тингуаита (33,7–34,1 и 104,9–110,6 м), а также хибинит среднезернистый массивный (196,5–501,0 м).

На первом этапе исследования выполнено сплошное геомеханическое описание керна, в ходе которого проанализированы параметры, характеризующие структурную нарушенность массива пород: индекс качества массива (RQD) и линейная частота трещин (FF/m). Значение RQD определяется как процентное отношение суммарной протяжённости кусков керна между естественными трещинами размером свыше 100 мм к длине описываемого интервала. Для определения значения FF/m подсчитывается количество открытых естественных трещин на 1 пог. м керна.

На втором этапе исследования отобраны 20 керновых проб равномерно по всей длине скважины. Каждая проба представлена одним литотипом и имеет протяженность порядка 2 м. Лабораторные исследования проводили на образцах керна правильной формы (цилиндрической) с отношением высоты к диаметру равным 2 (95,0x47,5 мм) и с использованием следующего экспериментального оборудования: штангенциркуль Micron, весы неавтоматического действия EJ-6100, машина испытательная ИП-1250М-авто. Для каждой пробы было изготовлено в среднем по 20 образцов. По результатам испытаний определены значения таких физико-механических свойств пород, как плотность (ГОСТ 30629–2011), предел прочности при одноосном сжатии (ГОСТ 21153.2–84), предел прочности при одноосном растяжении (метод сжатия по образующим, ГОСТ 21153.3–85).

Результаты

Анализ изменения структурной нарушенности массива пород с глубиной

В ходе работы изучено 335 интервалов керна субвертикальной скважины, общий выход которого (TCR) составил 99,7%. Общее распределение пород согласуется с литологическим строением района (рис. 2). Анализ литолого-геотехнической колонки и распределения показателей RQD и FF/m по разрезу скважины позволяет выявить особенности изменения структурного состояния массива пород с глубиной (рис. 3).

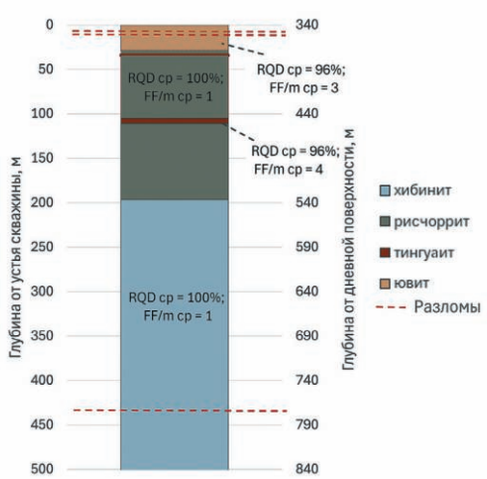


Рис. 2
Характеристика параметров структурной нарушенности массива пород в окрестности субвертикальной скважины

Fig. 2
Characterization of the structural disturbance parameters of the rock mass in the vicinity of the subvertical borehole

Верхняя часть разреза (до ~30 м), представленная преимущественно ювитами, характеризуется наибольшей изменчивостью параметров. Значения RQD варьируют в диапазоне от 80 до 100% при среднем значении 96%, интенсивность трещиноватости 2–4 трещ/м. На глубинах 7,4 и 14,0 м фиксируются кратковременные зоны тектонических нарушений, где наблюдается резкое ухудшение качества керна вплоть до его полной дезинтеграции (RQD = 0%). Таким образом, для верхней части разреза характерно сочетание относительно высокой сохранности массива с локальными зонами повышенной трещиноватости.

В интервале глубин 30–190 м, сложенном преимущественно рисчорритами, отмечается резкое повышение однородности геомеханических характеристик. Значения RQD стабилизируются на уровне 95–100%, а интенсивность трещиноватости не превышает 1–3 трещ/м. Это свидетельствует о формировании практически монолитного массива с минимальной степенью нарушенности. Исключение составляют интервалы, связанные с внедрением тингуаитовых даек мощностью 0,4 и 5,7 м, располо-

а) б)

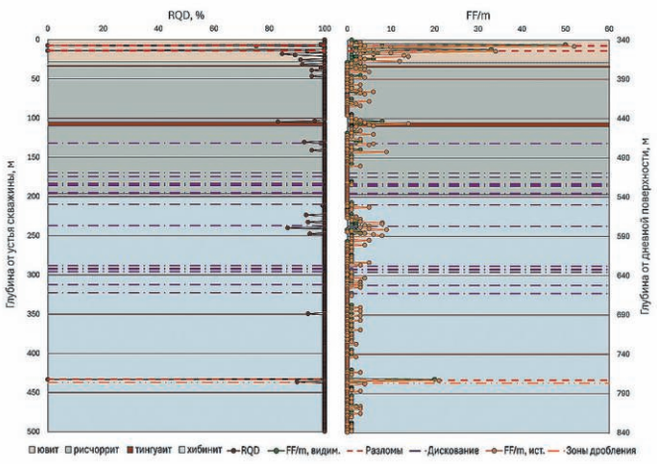


Рис. 3
Распределение значений RQD (а) и FF/m (б) вдоль профиля скважины

Fig. 3
Distribution of the RQD (a) and FF/m (б) values along the borehole profile

женных в рисчорритах на глубинах 33,7 и 104,9 м, для которых характерно некоторое увеличение трещиноватости (до 4 трещ/м) и снижение RQD до ~96%. Таким образом, дайки, несмотря на их высокие прочностные характеристики, в этом случае выступают локальными зонами ослабления, контрастирующими с вмещающими породами.

Начиная с глубины 196,5 м, где разрез представлен хибинитами, фиксируются наиболее благоприятные показатели качества массива: RQD устойчиво равен 100%, а FF/m, как правило, не превышает 1 трещ/м. Подобные значения соответствуют категории *excellent rock quality* по классификации Deere [17] и характеризуют массив как высокопрочный и практически ненарушенный. Даже на значительных глубинах (до забоя скважины) изменения этих параметров носят минимальный характер, что указывает на высокую степень монолитности пород. Отдельного внимания заслуживают локальные нарушения, выявленные на глубине 433,0 м (773 м от дневной поверхности), где отмечается маломощная зона дробления. Несмотря на ограниченную мощность подобные структуры свидетельствуют о влиянии тектонической активности на глубине и могут локально оказывать влияние на фильтрационные и прочностные свойства массива.

В интервале 130–320 м в рисчорритах и хибинитах выявлены зоны дискования керна, проявляющиеся в виде системы субпараллельных трещин с малым углом к оси скважины. С учётом морфологии и пространственного положения данные структуры интерпретируются как результат перераспределения напряжений при бурении, а не как проявление естественной трещиноватости массива. Примечательно, что зоны дискования не обнаруживают пространственной приуроченности к интервалам с повышенными значениями FF/m, что свидетельствует об отсутствии прямой связи между интенсивностью дискования и степенью естественной нарушенности массива. Вместе с тем их присутствие косвенно указывает либо на повышенный уровень напряжений, либо на снижение прочностных характеристик пород в этом диапазоне глубин.

Таким образом, исследуемый разрез характеризуется выраженной вертикальной зональностью трещиноватости. Общая тенденция к снижению интенсивности нарушенности с глубиной обусловлена прежде всего последовательной сменой литотипов (от ювитов через рисчорриты к хибинитам), тогда как локальные отклонения от этой тенденции определяются тектоническими нарушениями и структурными особенностями отдельных разновидностей пород.

Анализ изменения физико-механических свойств пород с глубиной их залегания

По результатам испытаний образцов 20 керновых проб (пробы пронумерованы по порядку с увеличением глубины) определены значения их плотности, пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении. Распределение этих значений в зависимости от глубины залегания пород показано на рис. 4–6.

На основе полученных экспериментальных данных установлено, что плотность изучаемых скальных пород (рис. 4) незначительно варьируется с глубиной (в среднем в пределах от 2,60 до 2,70 г/см^3) и не имеет выраженной тенденции изменения. Исключение составляет дайка тингуаита, значение плотности которой равно в среднем

а) б)

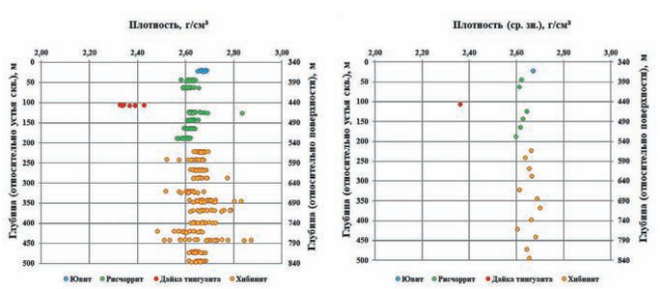


Рис. 4
Изменение значений плотности изучаемых скальных пород в зависимости от глубины залегания:
а – полный набор данных;
б – усредненные значения по пробам

Fig. 4
Changes in the density values of the studied hard rocks as a function of the burial depth:
a – complete data set;
б – average values or sample tests

а) б)

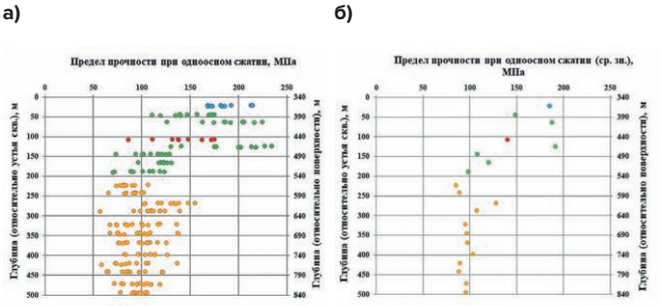


Рис. 5
Изменение значений пределов прочности при одноосном сжатии изучаемых скальных пород в зависимости от глубины залегания:
а – полный набор данных;
б – усредненные значения по пробам

Fig. 5
Changes in the uniaxial compressive strength values of the studied hard rocks as a function of the burial depth:
a –complete data set;
б – average values for sample tests

а) б)

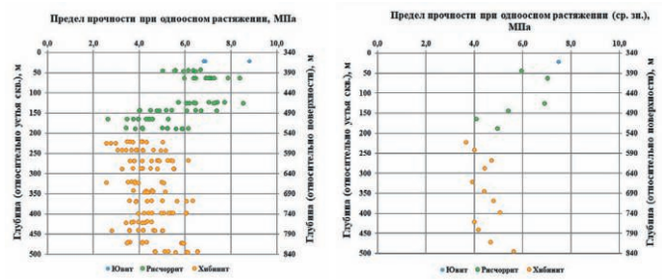


Рис. 6
Изменение значений пределов прочности при одноосном растяжении изучаемых скальных пород в зависимости от глубины залегания:
а – полный набор данных;
б – усредненные значения по пробам

Fig. 6
Changes in the tensile strength values of the studied hard rocks as a function of the burial depth:
a – complete data set;
б – average values for sample tests

2,36 г/см³. Коэффициенты вариации значений изучаемого параметра по пробам изменяются от 0,4–0,6% (ювит, часть проб рисчоррита и хибинита) до 3,4% (проба №18, хибинит). В целом, плотность скальных пород в пределах отобранных проб изменяется незначительно (среднее значение коэффициента вариации по всем пробам составляет 1,1%), а коэффициент вариации, равный 3,4% для пробы №18, может свидетельствовать о наличии как более, так и менее плотных включений.

По результатам испытаний образцов пород при одноосном сжатии выявлено (см. рис. 5), что на глубине от 20,0 до 140,0 м находится зона с высокопрочными ювитами и рисчорритами. Значения их пределов прочности в среднем изменяются от 150 до 192 МПа. Дайка тингуаита на этом участке имеет прочность при сжатии 141 МПа. На глубине от 140,0 до 501,0 м наблюдается уменьшение прочностных свойств исследуемых пород. Значение прочности при сжатии пород на этом участке в среднем составляет порядка 100 МПа. Коэффициент вариации значений прочности на глубине от 20,0 до 140,0 м изменяется в пределах от 9,1 (ювит) до 15,0–18,5% для проб рисчоррита и 20,4% для дайки тингуаита, а на глубине ниже 140,0 м – от 8,0 (пробы рисчоррита и хибинита) до 24,6% (проба №17, хибинит).

В ходе испытаний образцов пород при растяжении установлено (см. рис. 6), что наиболее прочные породы (ювит и рисчоррит) залегают на глубине от 20,0 до 140,0 м. Значения их пределов прочности при растяжении составляют в среднем от 6,0 до 7,5 МПа. На глубине ниже 140,0 м прочность исследуемых пород уменьшается и в среднем составляет 4,6 МПа. Коэффициент вариации значений прочности при растяжении изменяется в пределах от 9,2 (рисчоррит) до 15,1% (ювит) на глубине залегания от 20,0 до 140,0 м, а на глубине от 140,0 до 501,0 м – от 8,3 до 23,2% (хибинит). Средняя величина коэффициентов вариации значений прочности при сжатии и растяжении составила 16,0 и 15,7% соответственно, что, в целом, свидетельствует об умеренной вариабельности прочностных показателей и относительной неоднородности изучаемых проб скальных пород.

Обсуждение результатов

По результатам геомеханического описания керна субвертикальной скважины глубиной заложения 340,0 м от дневной поверхности и длиной 501,0 м выявлено, что изучаемый скальный массив характеризуется высоким качеством пород и низкой степенью структурной нарушенности, что подтверждается соотношением интервалов со значением RQD больше 90% (более 90% длины скважины) и количеством трещин на метр в среднем не превышающим 1–4 шт. При этом выделяются три локальные разломные зоны (зоны дробления) мощностью до 1,0–2,0 м в ювитах (на глубинах 7,4 и 14,0 м) и хибинитах (на глубине 433,0 м) с резким снижением значений RQD и, соответственно, ростом количества трещин FF/m.

Отдельного внимания заслуживают участки с признаками дискования керна, выявленные в рисчорритах и хибинитах. Они прослеживаются в интервалах глубин от 130,0 до 320,0 м от устья скважины, при этом не имеют пространственной приуроченности к участкам повышенных значений FF/m: массив в таких зонах можно охарактеризовать как монолитный. Таким образом, прямая связь между интенсивностью дискования и частотой трещин в пределах изученного разреза отсутствует.

По результатам проведенных лабораторных исследований керна установлено, что значения плотности изучаемых скальных пород с увеличением глубины залегания варьируются незначительно в среднем от 2,60 до 2,70 г/см³ и не имеют четко выраженной тенденции изменения. Значения же пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении с глубиной уменьшаются.

На рис. 7 представлено распределение значений пределов прочности при сжатии пород вдоль профиля скважины с наложением зон разломов, дробления и дискования.

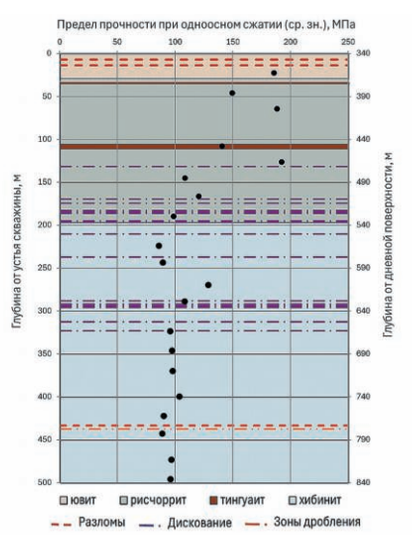


Рис. 7
Распределение значений пределов прочности при одноосном сжатии пород вдоль профиля субвертикальной скважины апатит-нефелинового месторождения Хибинского массива

Fig. 7
Distribution of uniaxial compressive strength values of rocks along the borehole profile of the apatite-nepheline deposit of the Khibiny massif

При анализе распределения значений прочности пород с глубиной (см. рис. 7) можно отметить, что начиная с глубины порядка 140,0 м от устья скважины предел прочности пород при одноосном сжатии снижается в среднем на 40%. Такое изменение прочности главным образом связано со сменой литотипов пород (с рисчоррита на хибинит). Однако оно фиксируется и в пределах однородной толщи

рисчорритов, в частности, совпадающей с зоной дискования пород. Это позволяет предположить, что причиной дискования является ослабление породного массива, обусловленное иными факторами (вероятно, влиянием механизмов выветривания и структурными особенностями пород).

Таким образом, с увеличением глубины для условий Хибинского массива в окрестности исследуемой субвертикальной скважины возрастает индекс качества массива, уменьшается количество трещин на метр, снижаются значения пределов прочности пород при сжатии и растяжении, тогда как их значения плотности в среднем составляют 2,64 г/см^3 и не претерпевают значительных изменений (за исключением дайки тингуаита).

Заключение

В результате выполненной работы на примере одного из апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива получены новые данные об изменении физико-механических свойств горных пород и их трещиноватости с глубиной залегания.

Установлено, что изучаемый скальный массив характеризуется высоким качеством пород и низкой степенью структурной нарушенности (интервалы со значением RQD больше 90% составляют более 90% длины всей скважины). По мере углубления наблюдается переход от умеренно трещиноватых и неоднородных пород верхней части разреза к практически монолитным породам нижних горизонтов, что связано со сменой литотипов: наиболее трещиноватые интервалы приурочены к ювитам и тингуаитовым дайкам, тогда как рисчорриты и особенно хибиниты характеризуются высокой степенью монолитности, что важно при перспективной оценке условий ведения горных работ и проектировании подземных сооружений.

Выявлены три локальные разломные зоны (зоны дробления) мощностью до 1,0–2,0 м в ювитах (на глубинах 7,4 и 14,0 м) и хибинитах (на глубине 433,0 м) с резким снижением значений RQD и, соответственно, ростом количества трещин FF/m.

Показано, что дискование керна наблюдается в интервалах участков пород с пониженными значениями прочности и практически не коррелирует с наличием естественной трещиноватости, что дополняет базу знаний о существующих геомеханических условиях в пределах месторождения и массива пород.

По результатам проведенных лабораторных исследований керна установлено, что значения плотности изучаемых скальных пород с увеличением глубины залегания варьируются незначительно и не имеют четко выраженной тенденции изменения, а значения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении пород уменьшаются на глубине от 340,0 до 480,0 м от дневной поверхности, а затем до глубины 841,0 м остаются в среднем на одном уровне (100 и 4,6 МПа соответственно). Изменение прочностных свойств главным образом связано со сменой литотипов пород, но также возможно влияние механизмов выветривания и структурных особенностей пород.

Полученные данные справедливы для исследуемого участка массива пород в окрестности субвертикальной скважины. Для выявления закономерностей изменения физико-механических свойств пород и их трещиноватости с увеличением глубины залегания планируется проведение дополнительных исследований в пределах Хибинского массива и месторождений Кольского региона.

Список литературы / References

1. Попов В.Н., Сильченко О.Б., Парамонова М.С. Об изменении физико-механических свойств горных пород с глубиной залегания. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2011;(5):108−117. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2011/5/Popov_5_2011.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
Popov V.N., Silchenko O.B., Paramonova M.S. On the changes of physico-mechanical properties of rocks with depth of a lying. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2011;(5):108−117. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2011/5/Popov_5_2011.pdf (accessed: 14.04.2026).
2. Цой П.А., Усольцева О.М. Изменение механических свойств горных пород в зависимости от глубины залегания. В кн.: *Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: тезисы докладов междунар. конф., г. Томск, 6–10 сентября 2021 г.* Томск: Изд-во ТГУ; 2021. С. 80. https://doi.org/10.17223/978-5-907442-03-0-2021-046
3. Lu Y., Li C., He Z., Gao M., Zhang R., Li C., Xie H. Variations in the physical and mechanical properties of rocks from different depths in the Songliao Basin under uniaxial compression conditions. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources.* 2020;6(3):43. https://doi.org/10.1007/s40948-020-00163-z
4. Wang H., Sun B., Cao C., Yu S., Wang H., Yuan Y., Zhong H. A comprehensive study on in situ stress field characteristics and changes in rock mechanical properties in deep mines in northeastern Yunnan, China. *Deep Underground Science and Engineering*. 2024;4(2):241−254. https://doi.org/10.1002/dug2.12124
5. Zhao Y., Wang X., Guo Y., Danesh N.N., Jiang Y. Mechanical properties and brittleness characteristics of sandstone from different burial depths. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources.* 2022;8(5):165. https://doi.org/10.1007/s40948-022-00470-7
6. Lanaro F., Sato T., Nakama S. Depth Variability of compressive strength test results of Toki Granite from Shobasama and Mizunami construction sites, Japan. *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2009;42(4):611–629. https://doi.org/10.1007/s00603-008-0017-x
7. Peng K., Liu Z., Zou Q. et al. Static and dynamic mechanical properties of granite from various burial depths. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019;52(10):3545–3566. https://doi.org/10.1007/s00603-019-01810-y

8. Abd El Aal A., Al Zamana Y., Dunquwah T., Alsalmi O., Hussain J., Iqbal J. et al. Depth variations as effective indicators for strength variation of Najran granites, Najran region, Saudi Arabia. *Frontiers in Materials.* 2025;12:1382313. https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1382313

9. Zhang Z., Xie H., Zhang R., Zhang Z., Gao M., Jia Z., Xie J. Deformation damage and energy evolution characteristics of coal at different depths. *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2019;52(5):1491–1503. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1555-5

10. Li D., Luo P., Zhu Z., Fang X., Zhou A., He X., Ma J. Experimental study on tensile and compressive mechanical properties of rocks from different depths at a deep mine. *Journal of Engineering Geology.* 2022;32(01):86–95. (In Chinese) https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0460

11. Дунаев А.В. Характер изменения трещиноватости пород ковдорского апатит-магнетитового месторождения с глубиной. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2010;(3):130–136. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2010/3/Dunaev_3_2010.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
Dunaev A.V. The behavior of fracturing of apatite-magnetite deposit of Kovdorskiy deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2010;(3):130–136. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2010/3/Dunaev_3_2010.pdf (accessed: 14.04.2026).

12. Боос И.Ю., Патачаков И.В., Гришин А.А., Абдуллаева А.А., Разин А.И., Актелова А.Ю. Изменчивость интенсивности трещиноватости с глубиной на Удерейском месторождении. *Московский экономический журнал.* 2020;(9):115–124.
Boos I.Yu., Putchkov I.V., Grishin A.A., Abdullayeva A.A., Razin A.I., Akalova A. Variability of fracture intensity with depth at Udereyskoe field. *Moscow Economic Journal.* 2020;(9):115–124. (In Russ.)

13. Song F., Dong Y.-H., Xu Z.-F., Zhou P.-P., Wang L.-H., Tong S.-Q., Duan R.-Q. Granite microcracks: Structure and connectivity at different depths. *Journal of Asian Earth Sciences.* 2016;124:156–168. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.04.023

14. Жиров Д.В. Морфоструктурные критерии контроля трещиноватости интрузивных пород: методические и прикладные аспекты реконструкции стресс-состояний. В кн.: *Сашурин А.Д. (ред.) Геомеханика в горном деле: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, г. Екатеринбург, 1–3 октября 2013 г.* Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 2014. С. 96–105.

15. Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л., Шпакова М.В., Чумляков В.А. Влияние трещиноватости на устойчивость бортов карьера и ее изменчивость по площади и глубине на Горевском месторождении. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2015;(11):32–40. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2015/11/32_40_11_2015.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
Shpakov P.S., Yunakov Yu.L., Shpakova M.V., Chumliakov V.A. Influence on stability fractured pit and its variability in size and depth on Gorevsky field. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2015;(11):32–40. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2015/11/32_40_11_2015.pdf (accessed: 14.04.2026).

16. Сергунин М.П., Дарбинян Т.П. Выделение параметров трещиноватости массива горных пород из геологических моделей, построенных в современных геоинформационных системах (на примере Micromine). *Горный журнал.* 2020;(1):39–42. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.07
Sergunin M.P., Darbinyan T.P. Identification of rock mass jointing parameters in geological models in modern geoinformation systems (in terms of Micromine). *Gornyi Zhurnal.* 2020;(1):39–42. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.07

17. Deere D.U. Technical description of rock cores for engineering purpose. *Rock Mechanics and Engineering Geology.* 1963;1(1):16–22.

Информация об авторах
Кузнецов Николай Николаевич – кандидат технических наук, руководитель лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны РФ, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-0624-4351; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru
Кулькова Мария Сергеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4417-0223; e-mail: m.kulkova@ksc.ru

Information about the authors
Nikolai N. Kuznetcov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Instrumental Study of Rock's State of the Russian Arctic Region, Department of Rock Mechanics, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-0624-4351; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru
Maria S. Kulkova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Laboratory for Forecasting the Rockburst hazard of ore deposits, Department of Rock Mechanics, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4417-0223; e-mail: m.kulkova@ksc.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 17.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 13.07.2026

Article info
Received: 17.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 13.07.2026