

УДК 622.023.25 : 539.32

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СТЕПЕНИ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ
НА ИЗМЕНЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД
ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗ ТАЛОГО В МЕРЗЛОЕ СОСТОЯНИЕ**

С. В. Сукнев

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: suknyov@igds.ysn.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Исследованы упругие свойства вмещающих пород на месторождении алмазов трубки “Ботуобинская” с помощью стандарта организации СТО 05282612-001-2013. Стандарт разработан на основе оригинальной методики, которая позволяет определять статические упругие свойства при изменении температуры или влажности материала, что не предусмотрено действующими российскими и международными стандартами, но имеет важное практическое значение для проектирования горных сооружений в криолитозоне. Испытание проводится путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций, что позволяет повысить точность измерений и физически корректно оценить влияние температуры и степени водонасыщения на изменение свойств материала при переходе из талого состояния в мерзлое. На основе анализа полученных экспериментальных данных установлены закономерности изменения упругих свойств скальных пород в широком диапазоне температур. Отмечено, что изменение упругих свойств в зависимости от степени водонасыщения носит существенно нелинейный характер.

Скальные породы, сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона, степень водонасыщения, низкие температуры

DOI: 10.15372/FTPRPI20190202

Упругость является фундаментальным физическим свойством горных пород, определяющим их механическое поведение. Для проектирования горных сооружений в криолитозоне или применения геотехнологий, предусматривающих замораживание породного массива, важно знать упругие свойства горных пород при различных температурах, в том числе в мерзлом состоянии. В [1 – 8] отмечается тенденция к увеличению модуля упругости с понижением температуры, однако ввиду большого разброса полученных значений говорить о достоверно установленных количественных закономерностях затруднительно. Значения коэффициента Пуассона имеют еще больший разброс либо он не определялся вовсе.

Разброс свойств обычно связывают с неоднородной структурой горных пород. В подавляющем большинстве работ испытания пород при различных температурах выполнялись на разных образцах. Как правило, испытание проводится до разрушения и по его данным строится

полная диаграмма, охватывающая все стадии деформирования образца. По ней определяют упругие свойства конкретного образца. Для каждого испытания используют новый образец. Такая постановка эксперимента не позволяет проследить за изменением свойств при изменении состояния образца. Построенные по данным испытаний зависимости свойств от температуры не вполне корректны, поскольку содержат погрешности, связанные с изменением свойств от образца к образцу, эффект от температуры накладывается на эффект от неоднородности между образцами. Установление физически корректных закономерностей возможно при испытании образца, подвергнутого изменяющимся температурным условиям. В этом случае разброс данных будет определяться только погрешностью, связанной с экспериментальной процедурой, и неоднородность между образцами не повлияет на результаты эксперимента.

Для определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии используют стандартные методы испытаний, например ГОСТ 28985-91, ASTM D7012-10 или DIN EN 14580 либо рекомендации ISRM [9–12]. Однако этими методами не предусмотрено проведение испытаний и определение упругих свойств материала непосредственно в процессе изменения его состояния (температура, влажность).

В соответствии с ГОСТ 28985-91 упругие свойства горных пород определяются на разгрузочной ветви диаграммы деформирования после нагружения образца до максимального уровня, который должен быть не ниже 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии. Поскольку для большинства горных пород необратимые структурные изменения, связанные с процессами образования новых трещин, начинаются при напряжениях, составляющих 30–50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии [13–15], применение ГОСТ 28985-91 для определения упругих свойств горных пород физически некорректно. Кроме того, из-за необратимых структурных изменений невозможно повторное испытание образца. Это не позволяет проследить за изменением упругих характеристик материала при изменении состояния образца.

Исследования влияния влажности на механические свойства горных пород обычно ограничиваются изучением свойств образцов в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. Однако для оценки степени их деградации, с целью обеспечения безопасности ведения горных работ, важно знать, как сильно изменяются свойства при низких и умеренных уровнях водонасыщения. Имеются единичные работы, в которых свойства горных пород изучаются в промежуточных (между воздушно-сухим и водонасыщенном) состояниях. Количество промежуточных точек с различным уровнем водонасыщения в них, как правило, невелико. В [7] свойства пород изучаются в воздушно-сухом, водонасыщенном состоянии и при одном уровне частичного водонасыщения, но делать по этим данным какие-то выводы о влиянии степени водонасыщения на прочностные и деформационные свойства проблематично.

Цель настоящей работы — установление закономерностей изменения статических упругих характеристик (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) скальных горных пород различной влажности в диапазоне изменения температуры испытания, характерном для условий криолитозоны, в которой расположены алмазные месторождения Якутии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач разработан метод определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона, позволяющий физически корректно определять упругие характеристики горных пород, в том числе при изменении их температуры и влажности [16, 17]. На его основе в ИГДС СО РАН разработан и введен в действие внутренний стандарт организации СТО 05282612-001-2013 [18]. Суть метода состоит в том, что продольные и поперечные

деформации измеряются при нагружении образца в определенном диапазоне, когда деформирование материала является линейно-упругим и не приводит к необратимым структурным изменениям. Снизу этот диапазон ограничен напряжениями, при которых происходит уплотнение образца, т. е. закрываются открытые микропоры и микротрещины. На диаграмме деформирования это проявляется в переходе от начального нелинейного участка к линейному. Сверху диапазон измерения ограничен напряжениями, при которых начинается накопление поврежденности, образование новых микротрещин, что приводит к необратимым структурным изменениям.

Отбор проб для изготовления образцов проводили из керна контрольно-стволовой скважины КСС-2 трубки “Ботуобинская” согласно разделу 2 ГОСТ 28985-91. Для испытания изготавливали призматические образцы квадратного сечения со стороной 50 ± 2 и высотой 150 ± 5 мм. Образцы вырезали на отрезном станке Колибри-2 из проб керна диаметром 92 мм. Торцевые и боковые поверхности образцов шлифовали на станке Montasupal для обеспечения требований к качеству подготовки образцов, установленных СТО 05282612-001-2013. Испытания образцов горных пород осуществляли на электромеханической универсальной испытательной машине UTS 250, оснащенной температурной камерой (рис. 1а).

Для регистрации деформаций на призматические образцы устанавливали продольные и поперечные экстензометры 0712.001 и 0712.004 фирмы Toni Technik либо экстензометры 3975 и 3542RA фирмы Epsilon. Эти датчики позволяют корректно и с высокой точностью измерять деформационные перемещения (абсолютные деформации) образца. Экстензометры подключали к блоку измерительной и управляющей электроники испытательной машины. Образец с экстензометрами помещали в температурную камеру машины (рис. 1б) и испытывали последовательно при комнатной температуре и при 0, –20 и –40 °С.

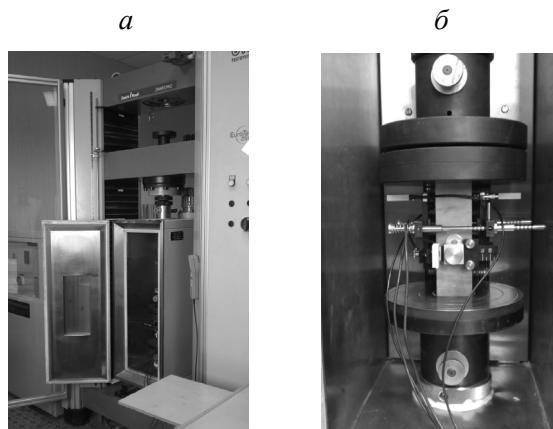


Рис. 1. Испытательная машина UTS 250 (а) и образец в температурной камере (б)

Работа испытательной машины и регистрация результатов измерений осуществлялись с помощью компьютера и программы testXpert. Испытание проводили путем многократного нагружения образца в диапазоне малых обратимых деформаций. Для определения упругих свойств нижнее напряжение σ_u принимали равным 0.5 от верхнего напряжения σ_o . При этом верхнее напряжение не должно было превышать одной трети от предела прочности материала при одноосном сжатии, который устанавливали предварительно в соответствии с ГОСТ 21153.2-84.

Процедура определения упругих свойств горных пород при низких климатических температурах выглядела следующим образом. Образец в температурной камере охлаждали до заданной температуры, о достижении которой судили по показаниям штатного датчика в камере

и по стабилизации показаний продольного датчика деформаций образца. Полагали, что заданная температура достигнута, если показания продольного датчика стабильны (с точностью 0.1 мкм) в течение не менее 30 мин. Общее время охлаждения и выдержки образца при заданной температуре составляло 2–3 ч.

После охлаждения образец несколько раз подвергали циклическому нагружению со скоростью 1 МПа/с до напряжения σ_o . Первые 1–2 цикла необходимы для предварительного уплотнения образца перед измерением деформаций. На последующих циклах проводили проверку условия обратимости и линейности деформаций и их измерение. Для расчета модуля упругости и коэффициента Пуассона использовали средние значения деформаций, измеренные на последующих циклах нагружения, что позволило повысить точность измерения малых деформаций и точность определения упругих свойств материала.

В процессе испытания с интервалом 0.1 с регистрировали изменение базы продольного и поперечного датчиков, вычисляли соответствующие деформации образца при нижнем и верхнем напряжении. По этим данным рассчитывали модули упругости E и коэффициенты Пуассона ν :

$$E = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{(\varepsilon_a)_o - (\varepsilon_a)_u}, \quad \nu = \frac{(\varepsilon_l)_u - (\varepsilon_l)_o}{(\varepsilon_a)_o - (\varepsilon_a)_u}.$$

Здесь $(\varepsilon_a)_u$, $(\varepsilon_a)_o$ — измеренные продольные деформации при нижнем и верхнем напряжении соответственно; $(\varepsilon_l)_u$, $(\varepsilon_l)_o$ — измеренные поперечные деформации при нижнем и верхнем напряжении. Затем образец охлаждали до новой температуры и повторяли испытание.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а, б приведены изменения модуля упругости (модуля Юнга) E и коэффициента Пуассона ν трех образцов алевролита, обозначенных цифрами 1, 2, 3, в воздушно-сухом состоянии в зависимости от температуры. Каждый образец испытывали три раза. Для предотвращения образования конденсата на поверхности образца принимали меры к его гидроизоляции. Перед каждым испытанием и после него контролировали влажность (вес) образца. Повторное испытание проводили спустя несколько дней после предыдущего, убедившись в стабилизации воздушно-сухого состояния образца. Повторяемость результатов определения упругих свойств составила: для E — выше 99 %, для ν — выше 94 %. С понижением температуры модуль упругости образцов алевролита линейно возрастает, в то время как коэффициент Пуассона сохраняет постоянное (в пределах погрешности эксперимента) значение. Скорость возрастания модуля упругости с понижением температуры составила от 0.017 до 0.038 ГПа/град. Изменения модуля упругости и коэффициента Пуассона трех образцов известняка в зависимости от температуры представлены на рис. 2в, г.

Как и для алевролита, отмечается тенденция к увеличению модуля упругости с понижением температуры образца при сохранении постоянного значения коэффициента Пуассона. Скорость возрастания модуля упругости с понижением температуры составила от 0.031 до 0.149 ГПа/град. При сохранении общей тенденции характер поведения модуля упругости различных образцов может различаться. В большинстве случаев наблюдалось линейное возрастание модуля упругости, на некоторых образцах обнаружено нелинейное и даже немонотонное поведение модуля с температурой. Отклонение от линейности было незначительным, но достаточно четко регистрировалось в эксперименте, что свидетельствует о высокой чувствительности разработанного метода определения упругих свойств горных пород.

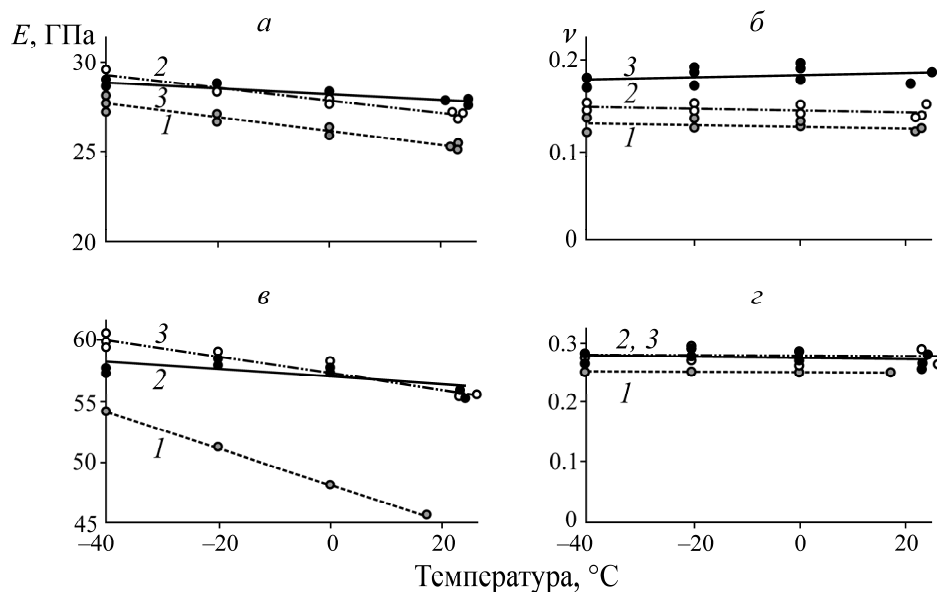


Рис. 2. Зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона для трех образцов алевролита (а, б) и известняка (в, г) от температуры

Образцы испытывали во влажном состоянии при низких и умеренных уровнях водонасыщения. Их выдерживали в эксикаторе для обеспечения равномерного распределения влаги. Перед испытанием и после него контролировали влажность. На рис. 3а, б показаны изменения E и ν образца алевролита в зависимости от температуры в воздушно-сухом (прямые 1) и влажном (прямые 2 и 3) состоянии при двух уровнях водонасыщения: 6.5 и 40 % от максимального количества влаги, которое содержит образец в водонасыщенном состоянии, и которое составило 2.6 % по отношению к массе образца в воздушно-сухом состоянии. Аналогичные данные приведены на рис. 3в, г для другого образца алевролита. Степень водонасыщения — 15 и 41 % от максимального количества влаги в водонасыщенном состоянии, равном, в свою очередь, 1.6 % по отношению к массе образца в воздушно-сухом состоянии.

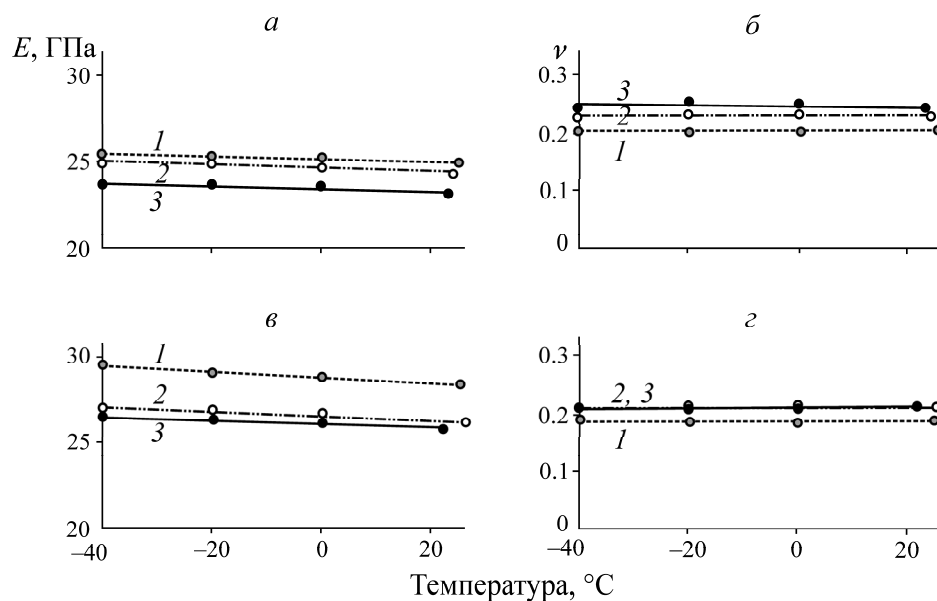


Рис. 3. Зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона образцов алевролита от температуры при различных уровнях водонасыщения

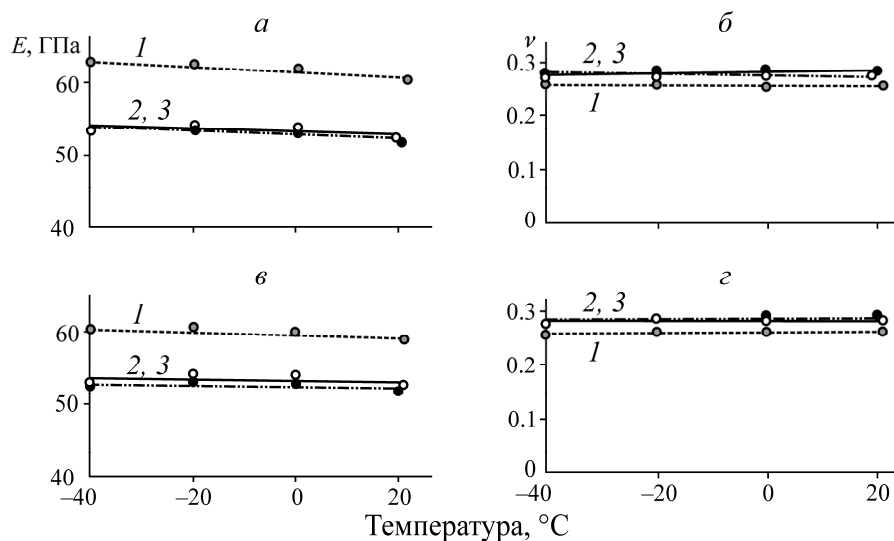


Рис. 4. Зависимости модуля Юнга и коэффициента Пуассона образцов известняка от температуры при различных уровнях водонасыщения

На рис. 4 показаны изменения E и ν двух образцов известняка. Первый образец (рис. 4а, б) испытывали в воздушно-сухом (прямые 1) и влажном (прямые 2, 3) состоянии при уровнях водонасыщения 12 и 33 % от максимального количества избыточной влаги, которое содержит водонасыщенный образец, и которое составило 0.5 % по отношению к массе образца в воздушно-сухом состоянии. Степень водонасыщения второго образца (рис. 4в, г) — 22 и 35 % от максимального количества влаги в водонасыщенном состоянии, составившем 0.8 % по отношению к массе образца в воздушно-сухом состоянии. С увеличением влажности наблюдается снижение модуля упругости и повышение коэффициента Пуассона испытанных образцов во всем температурном диапазоне. При этом поведение упругих характеристик качественно не изменяется: сохраняются скорость возрастания модуля упругости с понижением температуры и постоянство коэффициента Пуассона в исследованном температурном диапазоне.

Обращает на себя внимание, что значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона влажных образцов очень близки. Изменение влажности образца в данном диапазоне слабо влияет на его упругие свойства по сравнению с воздушно-сухим состоянием. Это свидетельствует о существенно нелинейном поведении упругих характеристик материала в зависимости от влагосодержания. Причиной такого поведения свойств является снижение эффективности воздействия влаги на минеральный скелет горной породы по мере ее насыщения водой. Поскольку это воздействие осуществляется через поверхность пор, оно наиболее эффективно при низких уровнях водонасыщения. По мере заполнения поры водой эффективность воздействия влаги на минеральный скелет снижается, так как в этом процессе не участвует часть воды, находящаяся во внутренних областях поры.

Для исследования влияния влажности на изменение свойств материала образец насыщали в ванне с водой до максимального уровня, затем его извлекали из ванны, устанавливали экстензометры на образец, и помещали образец на испытательную машину. Испытания проводили при комнатной температуре в процессе естественного высыхания образца через определенные промежутки времени. По диаграммам деформирования рассчитывали значения E и ν . Цикл испытаний одного образца составлял 28 сут. В течение этого времени образец оставался на машине. Предварительно для образца строили диаграммы водонасыщения и водопотери, измеряя его вес при насыщении водой и затем — при высыхании. Высушивание образца так же, как и его последующие испытания, проводилось при комнатной температуре естественным путем.

На рис. 5 показаны изменения E и ν в процессе высыхания образцов. Первые измерения выполнены через 1 ч после извлечения образца из ванны.

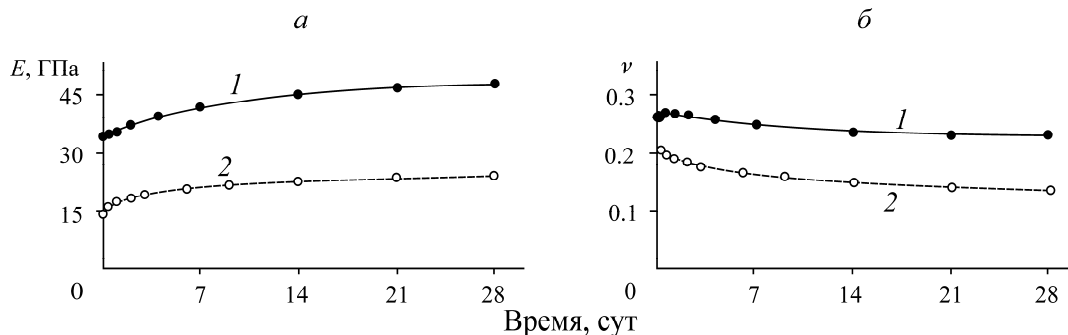


Рис. 5. Зависимости модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) известняка (1) и алевролита (2) от времени высыхания

Модуль Юнга алевролита демонстрирует монотонное увеличение, а коэффициент Пуассона — монотонное уменьшение с потерей влаги образцом. Наиболее интенсивно упругие свойства алевролита изменяются в первые сутки и затем стабилизируются по мере высыхания образца. Изменение свойств испытанного образца известняка происходит более сложным путем. Модуль Юнга также монотонно увеличивается, но в отличие от алевролита его изменение в первые часы после начала высушивания незначительно. Коэффициент Пуассона ведет себя немонотонно и в первые часы показывает рост, который затем сменяется снижением.

Причина такого поведения упругих свойств состоит, по-видимому, в том, что в водонасыщенном состоянии заполненные водой поры представляют собой жесткие включения в упругом скелете горной породы ввиду несжимаемости жидкости. Появление в материале при высоких степенях водонасыщения большого количества жестких включений приводит к увеличению его упругих модулей, что проявляется в аномальном поведении модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

Графики относительного изменения (увеличения модуля Юнга и уменьшения коэффициента Пуассона) упругих характеристик в процессе высыхания образцов приведены на рис. 6. Изменение свойств рассчитано в сравнении с воздушно-сухим состоянием, которое достигается по окончании цикла испытаний. Там же приведены графики относительного уменьшения избыточной влаги в образцах. Максимальная влажность образцов составила: известняка — 1.6, алевролита — 4.4 %.

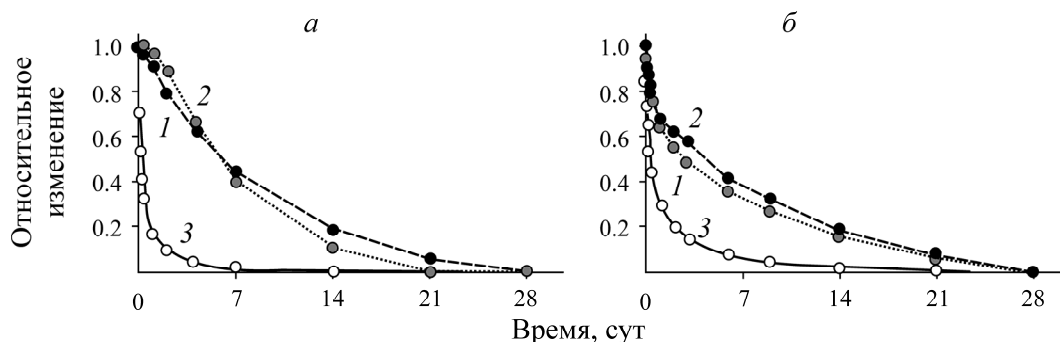


Рис. 6. Относительное изменение модуля Юнга (1), коэффициента Пуассона (2), влажности (3) известняка (а) и алевролита (б) от времени высыхания

Представленные на рис. 6 графики позволяют провести сравнение скоростей изменения влажности образцов и их упругих характеристик. Видно, что восстановление упругих свойств происходит гораздо медленнее, чем высыхание образцов. В результате модуль Юнга и коэффициент Пуассона изменяются медленно (относительно скорости высыхания образцов) при высоких уровнях водонасыщения и достаточно быстро при низких уровнях, когда скорость изменения влажности образцов мала. Это подтверждает сделанный вывод о том, что изменение упругих свойств горных пород в зависимости от их влажности носит существенно нелинейный характер.

На рис. 7 приведены данные об изменении упругих свойств испытанных образцов в период высушивания от 1 до 28 сут, когда процесс высыхания можно считать квазистационарным, а распределение влаги в образце — однородным.

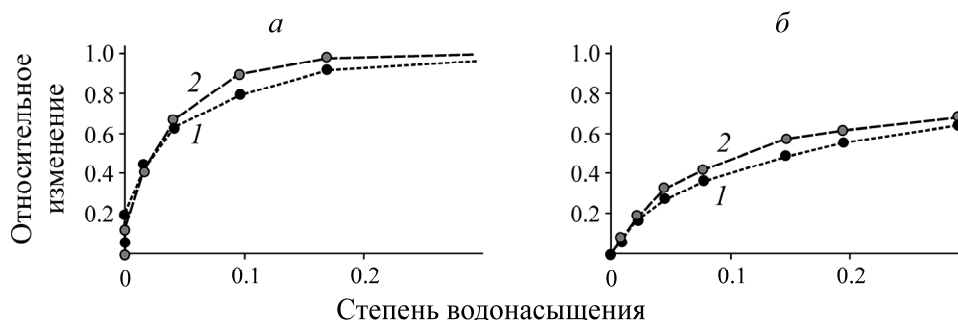


Рис. 7. Относительное изменение модуля Юнга (1) и коэффициента Пуассона (2) известняка (а) и алевролита (б) от степени водонасыщения

При низких уровнях водонасыщения (до 0.2 от максимального уровня) упругие свойства демонстрируют достаточно быстрое изменение (уменьшение E и увеличение ν). Изменение свойств алевролита составило более 50% от максимального, которое достигается в водонасыщенном состоянии по сравнению с воздушно-сухим. Для известняка это изменение превысило 90%. При влажности образца, составляющей всего 20% от максимального уровня, его упругие характеристики практически соответствуют значениям в водонасыщенном состоянии.

ВЫВОДЫ

В соответствии со стандартом организации СТО 05282612-001-2013 выполнены исследования статических упругих характеристик вмещающих пород (известняк, алевролит) трубки “Ботуобинская” различной влажности в диапазоне изменения температуры испытания от +20 до –40 °С, характерном для условий криолитозоны, в которой расположены алмазные месторождения Якутии. В результате проведенных исследований установлено:

- с понижением температуры при переходе материала из талого в мерзлое состояние модуль упругости исследованных образцов скальных пород линейно возрастает, в то время как коэффициент Пуассона сохраняет постоянное (в пределах погрешности эксперимента) значение;
- с увеличением влажности образцов наблюдается снижение модуля упругости и повышение коэффициента Пуассона во всем температурном диапазоне. При этом поведение упругих характеристик качественно не изменяется: сохраняются скорость возрастания модуля упругости с понижением температуры и постоянство коэффициента Пуассона в исследованном температурном диапазоне;
- изменение упругих свойств скальных пород в зависимости от их влажности носит существенно нелинейный характер. Наиболее быстрое их изменение (по сравнению с воздушно-сухим состоянием) происходит при низких уровнях водонасыщения.

Автор выражает благодарность А. И. Рукавишникову и Н. В. Попову за помощь в подготовке образцов и проведении испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mellor M.** Mechanical properties of rocks at low temperatures, Permafrost: North American contribution to the Second Int. Conf. (Yakutsk, USSR, July 13–28, 1973), Washington, Nat. Acad. Sci., 1973. — P. 334–344.
2. **Inada Y. and Yokota K.** Some studies of low temperature rock strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr, 1984, Vol. 21, No. 3. — P. 145–153.
3. **Särkkä P. and Pöllä J.** Strength and deformation characteristics of a gabbro rock between –10 °C and –60 °C, Safety and environmental issues in rock engineering: Proc. Int. Symp. Eurock 93 (Lisbon, Portugal, June 21–24, 1993), Rotterdam, Balkema, 1993, Vol. 1. — P. 371–377.
4. **Yamabe T. and Neaupane K. M.** Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2001, Vol. 38, No. 7. — P. 1029–1034.
5. **Liu Q. S., Xu G. M., Hu Y. H., and Chang X.** Study on basic mechanical behaviors of rocks at low temperatures, Key Engineering Materials, 2006, Vol. 306–308. — P. 1479–1484.
6. **Chen Y., Azzam R., Wang M., Xu S., and Chang L.** The uniaxial compressive and tensile tests of frozen saturated clay in Shanghai area, Environ. Earth Sci., 2011, Vol. 64, No. 1. — P. 29–36.
7. **Kodama J., Goto T., Fujii Y., and Hagan P.** The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 62. — P. 1–13.
8. **Al-Omari A., Brunetaud X., Beck K., and Al-Mukhtar M.** Coupled thermal–hygric characterisation of elastic behaviour for soft and porous limestone, Constr. Build. Mater, 2014, Vol. 62. — P. 28–37.
9. **ГОСТ 28985-91.** Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 11 с.
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 Int., 2010.
11. **DIN EN 14580:2005-07.** Prüfverfahren für Naturstein — Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.
12. **ISRM suggested methods.** Rock characterization testing and monitoring / Ed. E. T. Brown, Oxford: Pergamon Press, 1981.
13. **Martin C. D. and Chandler N. A.** The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1994, Vol. 31, No. 6. — P. 643–659.
14. **Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., and Read R. S.** Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock, Can. Geotech. J., 1998, Vol. 35, No. 2. — P. 222–233.
15. **Hakala M., Kuula H., and Hudson J. A.** Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: a case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2007, Vol. 44, No. 1. — P. 14–46.
16. **Сукнев С. В.** Методика определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона при изменении температуры образца // ГИАБ. — 2013. — № 8. — С. 101–105.
17. **Сукнев С. В.** Определение статических упругих свойств горных пород при изменении температуры // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 161–171.
18. **Сукнев С. В.** Опыт разработки и применения стандарта организации для определения упругих свойств горных пород // Горн. журн. — 2015. — № 4. — С. 20–25.

Поступила в редакцию 11/XII 2018

После доработки 11/XII 2018

Принята к публикации 26/III 2019