

Влияние циклических изменений величины одноосного сжатия на относительную проницаемость базальтов и известняков

Сергей Викторович БИРЮЛИН,
Ирина Анатольевна КОЗЛОВА,
Анатолий Константинович ЮРКОВ

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Россия, Екатеринбург

Актуальность работы. Изменения структуры области упругих напряжений деформируемого блока земной коры могут определять поведение ряда индикаторов предстоящих сейсмических событий. Поэтому важным вопросом является изучение изменений структуры порового пространства в условиях сжатия для понимания поведения физических явлений и процессов, происходящих при подготовке сейсмических событий.

Цель работы: изучение изменения проницаемости образцов горных пород при одноосном сжатии в условиях циклически меняющегося сжимающего напряжения.

Методология исследования: проектирование и сборка установки, последующее проведение серии экспериментов над образцами горных пород различного состава в условиях одноосного сжатия.

Результаты. В данной работе приведены результаты изучения изменений восстановления давления в балластной камере, характеризующего относительную проницаемость, для образцов андезит-базальтов и известняка при циклическом одноосном сжатии. Построены зависимости изменения проницаемости от циклического изменения давления на образцах.

Выводы. Исследовались образцы андезит-базальтового состава и известняки. В ходе экспериментов установлено, что при одноосном сжатии образцов горных пород происходят изменения их проницаемости. В подавляющем большинстве случаев при увеличении давления гидравлического пресса на образцы их проницаемость уменьшалась до достижения критического значения, после которого проницаемость начинала увеличиваться вплоть до разрушения образца. Установлено, что проницаемость исследованных образцов известняков изменяется с увеличением величины одноосного сжатия по-другому по сравнению с образцами андезит-базальтов. Они сохраняют свою проницаемость на одном уровне, вплоть до начала трещинообразования. Для образцов андезит-базальтового состава характерен возврат значений проницаемости при циклических изменениях давления (возврате давления к начальному уровню). Полученный результат подтверждает наличие упругих деформаций в исследованных образцах андезит-базальтов.

Ключевые слова: одноосное сжатие, упругие деформации, циклическое одноосное сжатие, андезит-базальт, известняк, проницаемость.

Введение
Подготовка тектонических землетрясений происходит в области упругих напряжений деформируемого блока земной коры. После разгрузки (снятия напряжения) в области очага геологическая среда может вернуться в исходное состояние и готова снова накапливать напряжение, если не произошло необратимых разрушений. Изменение напряженно-деформированного состояния горного массива напрямую отражается в изменениях структуры порового пространства слагающих его горных пород, т. е. влияет на их проницаемость, пористость и трещиноватость. Эти изменения структуры влияют на физические явления, которые могут выступать в качестве индикаторов готовящегося сейсмического события. Особенно это важно для объяснения вариаций объемной активности почвенного радона. Поэтому изучение характера изменения структуры порового пространства в условиях сжатия, которое пока возможно только на образцах горных пород, является важным для понимания процессов, происходящих как в очаге землетрясения, так и при производстве подземных горных работ.

На изучение изменения проницаемости горных пород при увеличении давления обращали внимание многие исследователи [1]. В основном это было связано с изменениями проницаемости коллекторов в условиях повышенных давлений. Внимание исследователей концентрировалось на изучении проницаемости при условиях, существующих на нефтяных и газовых месторождениях [2, 3], т. е. ограничивалось породами осадочного генезиса. Исследований на кристаллических породах известно очень мало. Следует отметить работу [4] по исследованию проницаемости образцов базальта. В работе [5] показано, что в образцах горных пород андезит-базальтового состава при увеличении давления проницаемость монотонно уменьшается вплоть до разрушения образца. Для известняков проницаемость практически не меняется до начала интенсивного трещинообразования. Исследования объемной активности радона (ОАР) в шахтах при подготовке горных ударов показали, что наблюдаемые вариации ОАР при подготовке горных ударов связаны в большей мере с изменением коэффициента эманирования горных пород, который при сохранении РТ-условий в точке измерений определяется содержаниями урана и тория, а также существующей проницаемостью горных пород. Коэффициент эманирования горных пород зависит от проницаемости горных пород, которая не всегда связана с пористостью [6]. Было отмечено, что поведение ОАР при подготовке горных ударов для условий горных выработок Северо-Уральского бокситового района различается и зависит от того, в каких породах (известняки или бокситы) находится аппаратура, регистрирующая радон. Аномалии ОАР в известняках, предшествующие горному удару, начинались не ранее чем за 1 ч до события. При измерениях в бокситах аномальные значения ОАР начинали проявляться почти за сутки до горного удара [7]. С точки зрения проявления деформаций, известняки представляют собой менее пластичную горную породу по сравнению с бокситами. Приведенные в работе [5] результаты по изменению проницаемости известняков объясняют поведение ОАР в известняках при изучении горных ударов на шахтах СУБРа.

✉ serrega2009@gmail.com

🌐 <https://orcid.org/0000-0001-8115-8034>

✉ ikozlova75@mail.ru

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-0281-9218>

✉ akyurkov@mail.ru

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-6790-0340>

Целью исследований было изучение изменения проницаемости образцов горных пород при одноосном сжатии в условиях циклически меняющихся различных величин сжимающего напряжения. При наличии упругих деформаций после снятия нагрузки проницаемость должна возвращаться к исходному уровню. Исследование изменения проницаемости при циклических изменениях сжимающей нагрузки использовано в ряде работ [8]. Стоит отметить, что при исследованиях на разработанном лабораторном стенде регистрировались только относительные изменения проницаемости по измерениям времени восстановления давления в балластной камере лабораторного стенда.

Одноосное сжатие, при котором проводилось изучение изменения проницаемости, в какой-то мере моделирует условия подготовки горных ударов в подземных выработках. Кроме того, условия одноосного сжатия достаточно просто реализовать в лабораторных условиях и организовать проведение измерений.

Аппаратура и методика

Для выполнения экспериментов был разработан и изготовлен специальный лабораторный стенд (рис. 1), включающий гидравлический пресс, манометр, балластную камеру, устройство для герметичного закрепления исследуемого образца, двухходовой вакуумный кран, коммуникационные соединения, вакуумный насос. При изготовлении балластной камеры и внутренних каналов использован опыт исследований, приведенный в работе [9].

Исследования выполнялись на образцах эффузивных горных пород андезит-базальтового состава и известняках девонского возраста. Образцы представляли собой отобранный керн из скважин диаметром 60 мм и высотой 70 мм.

Подготовленный образец цилиндрической формы устанавливался на балластную камеру и вместе с ней помещался под пресс. Для герметизации использовались специально подготовленные прокладки из алюминия. Именно с неплотным прилеганием образцов к рабочей поверхности связаны основные ошибки определения величины проницаемости, что было отражено в работе [10]. После установки образца под пресс проверялась герметичность собранной установки при давлении пресса на образец в пределах 0,5–1,5 МПа.

Методика проведения исследований заключалась в следующем: с помощью вакуумного насоса при открытом двухходовом кране вакуумировалась балластная камера до достижения давления около 0,04–0,05 атм (используемый манометр имеет шкалу в делениях атмосферы). Время восстановления или выравнивания давления при экспериментальных определениях проницаемости используется различными авторами довольно часто [11]. После этого вакуумный насос отключался и начинался отсчет времени восстановления давления в балластной камере. В зависимости от величины проницаемости образцов интервалы восстановления давления изменялись. Для образцов с небольшой проницаемостью измерялось время восстановления давления через промежутки в 0,01 атм, для всех остальных время изменение давления фиксировалось через 0,1 атм. До полного восстановления давления в балластной камере эксперименты доводились не всегда. Это обусловлено продолжительным временем восстановления давления при небольших градиентах в конечной стадии эксперимента. При проведении исследований особое внимание было уделено выбору размеров исследуемых образцов и скорости изменения нагрузки, учитывая результаты, приведенные в работах [12, 13].

Первоначально снималась фоновая кривая восстановления давления в балластной камере при начальном давлении на образец (обычно это 1,5 МПа). Далее дискретно повышалось давление на образец на 0,5–1 МПа и снималась кривая восстановления давления. Затем давление на образец снижалось до фонового и снималась кривая восстановления давления в балластной камере. Такие шаги повторялись при очередном повышении давления на образец вплоть до разрушения образца, которое фиксировалось как по значимому увеличению проницаемости (уменьшению времени восстановления давления), так и визуально – по появлению трещин и сколов.

Торцы образцов были закрыты уплотняющими алюминиевыми прокладками, поэтому поступление наружного воздуха в образец и далее в балластную камеру происходило только через его боковые поверхности.

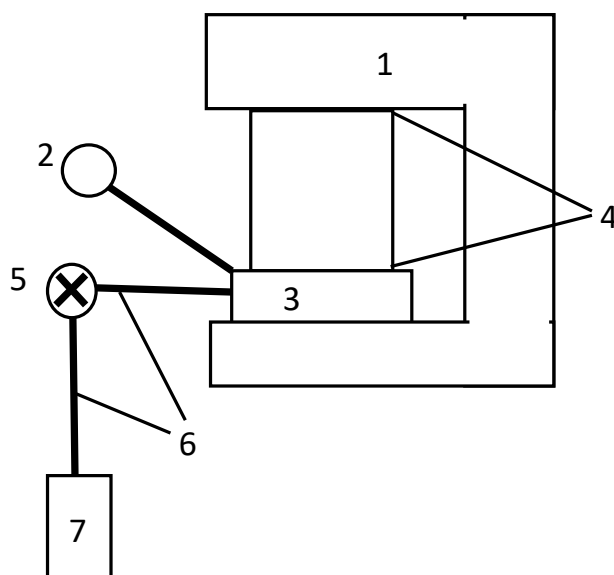


Рисунок 1. Блок-схема лабораторного стенда. 1 – гидравлический пресс, 2 – манометр, 3 – балластная камера, 4 – устройство для герметичного закрепления исследуемого образца, 5 – двухходовой вакуумный кран, 6 – коммуникационные соединения, 7 – вакуумный насос.
Figure 1. Block diagram of a laboratory bench. 1 – hydraulic press, 2 – pressure gauge, 3 – ballast chamber, 4 – device for sealed fastening the test sample, 5 – two-way vacuum valve, 6 – communication connections, 7 – vacuum pump.

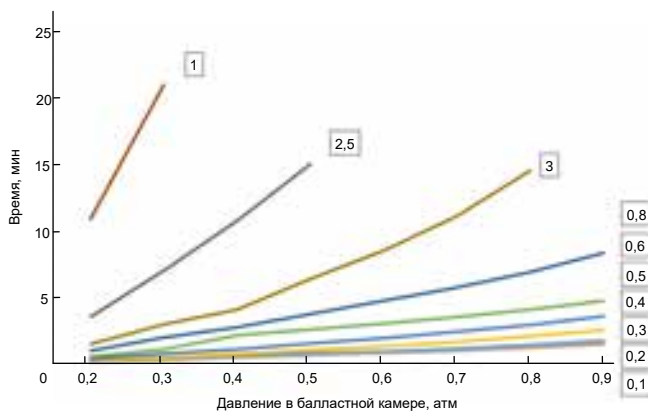


Рисунок 2. График изменения проницаемости для породы андезит-базальтового состава. Цифры в квадратах обозначают давление пресса в МПа [5].
Figure 2. Graph of change in permeability for andesite-basalt composition. The numbers in squares indicate the pressure of the press in MPa [5].

Обсуждение результатов

На рис. 2 представлен график [5], который получен при дискретном увеличении давления пресса без возврата к исходному для образца андезит-базальтового состава.

Общий интервал изменения давлений пресса составил от 0,1 до 3 МПа. При давлениях пресса до 0,3 МПа проницаемость оставалась на одном уровне. Стоит отметить, что в данной работе рассмотрены относительные изменения проницаемости по измерениям времени восстановления давления в балластной камере. При последующих увеличениях давления пресса проницаемость уменьшалась, вплоть до значения в 1 МПа. При этом значении, вероятно, все микротрещины и поры максимально сжались, что обусловило минимальную проницаемость. При давлении пресса в 2,5 МПа проницаемость начала увеличиваться, что может говорить о начале появлении трещин. Тенденция к увеличению проницаемости продолжилась до давления пресса в 3 МПа.

На рис. 3 представлен график изменения проницаемости при изменении давления без возврата к исходному для образца известняка [5]. Из рис. 3 видно, что при давлениях пресса от 0,2 до 1,5 МПа проницаемость оставалась примерно на одном уровне. Увеличение проницаемости начинается с давления 2,5 МПа. Визуально при этом давлении на

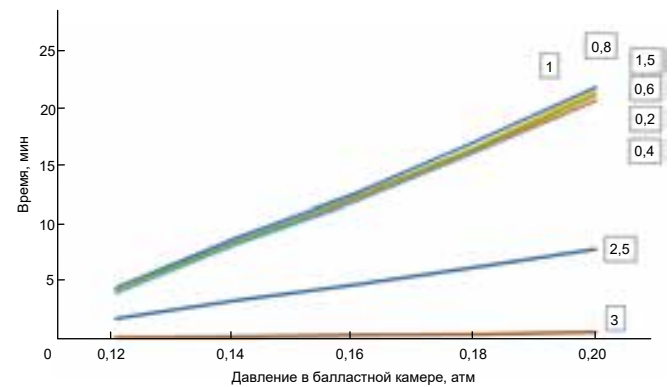


Рисунок 3. График изменения проницаемости для известняка. Цифры в квадратах обозначают давление пресса в МПа [5].
Figure 3. Permeability graph for limestone. The numbers in squares indicate the pressure of the press in MPa [5].

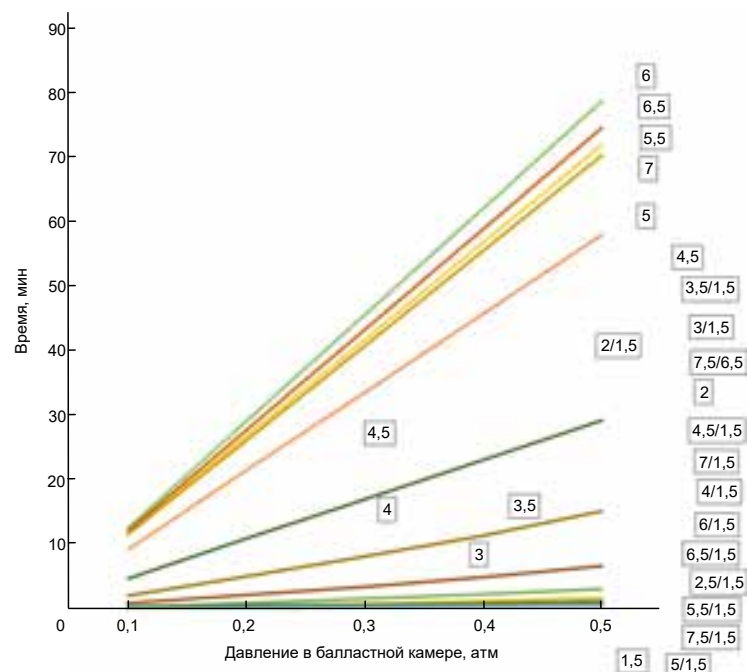


Рисунок 4. График изменения проницаемости для образца андезит-базальтового состава при циклическом изменении давления. Цифры в квадратах обозначают давление пресса в МПа. Цифры в квадратах с косой чертой (/) относятся к кривой изменения давления в балластной камере при изменении давления пресса от повышенного (перед чертой) к начальному (после черты) в МПа.

Figure 4. Graph of permeability changes for an andesite-basalt composition sample under cyclic pressure changes. The numbers in squares indicate the pressure of the press in MPa. The numbers in squares with a slash (/) refer to the pressure change curve in the ballast chamber when the press pressure changes from elevated (before the line) to the initial (after the line) in MPa.

образце начинают появляться сколы и трещины. Такое поведение кривой восстановления давления (проницаемости) свидетельствует о том, что для образца известняка практически отсутствует участок упругой деформации. Поэтому для образцов известняка измерения при циклических изменениях нагрузки не проводились. Исследования проницаемости известняков при изменениях как одноосного, так и всестороннего давления проводились многими авторами, например, аналогичные результаты для известняков были получены в работе [14].

Для подтверждения наличия в образцах упругих деформаций были проведены исследования изменения проницаемости при циклическом изменении величины давления. В этом случае при наличии упругих деформаций проницаемость должна восстанавливаться после снятия давления.

На рис. 4 показаны результаты изменения кривых восстановления давления в балластной камере при циклических изменениях величины одноосного сжатия. Общий интервал изменения давления составил от 1,5 до 7,5 МПа. Давление изменялось циклически от исходного базового к повышенному и обратно. При давлении 7,5 МПа образец разрушился. Как мы видим из приведенного графика, после каждого возврата от повышенного давления пресса к исходному базовому проницаемость каждый раз возвращалась практически на исходный уровень. Такое поведение кривой восстановления давления в балластной камере указывает на наличие участка упругих деформаций практически во всем диапазоне изменения одноосного сжатия. На всем диапазоне изменения давления по измерению сигналов акустической эмиссии проявлялся эффект Кайзера. Полученные результаты согласуются с выводами, сделанными в работе [15] о проявлении эффекта Кайзера только в пределах упругих деформаций.

Заключение

Выполненные исследования показали, что при одноосном сжатии образцов горных пород происходят изменения их проницаемости. Чаще всего при увеличении давления пресса на образцы проницаемость уменьшалась до достижения критического значения, после которого проницаемость начинала увеличиваться вплоть до разрушения образца. Установлено, что исследованные образцы известняков являются существенно менее пластичными в сравнении с андезит-базальтами и сохраняют свою проницаемость на одном уровне, вплоть до начала трещинообразования. Для образцов андезит-базальтового состава характерен возврат значений проницаемости при циклических изменениях давления (возврате давления к начальному уровню). Полученный результат возможен только при наличии упругих деформаций в исследованных образцах андезит-базальтов. Результаты исследования изменения проницаемости известняков при изменении сжимающей нагрузки объясняют различия в поведении кривых объемной активности радона, полученных при изучении процесса подготовки горных ударов на шахтах СУБРа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А. Петрофизика. М.: Недра, 1991. 368 с.
2. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 50–62.
3. Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщенности горных пород. М.: Недра, 1975. 334 с.
4. Malik A., Chakraborty T., Rao S. Strain rate effect on the mechanical behavior of basalt: observations from static and dynamic tests // Thin-walled structures. 2018. Vol. 126. P. 127–137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.014>
5. Бирюлин С. В. Изменение проницаемости горных пород в условиях одноосного сжатия // XIX Урал. молодеж. науч. школа по геофизике: сборник науч. материалов. 2018. С. 24–26.
6. Федорова А. Я. Вопросы определения проницаемости горных пород // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения. 2016. С. 311–316.
7. Уткин В. И., Юрков А. К. Радон как «детерминированный» индикатор природных и техногенных геодинамических процессов // ДАН. 2009. Т. 426, № 6. С. 816–820.
8. Хашпер А. Л., Аминев Т. Р., Федоров А. И., Жонин А. В. Исследование зависимости проницаемости горной породы от ее напряженно-деформированного состояния // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 133–140. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10>
9. Устройство для определения пористости и проницаемости образцов горных пород: пат. 2342646 Рос. Федерация / Афиногенов Ю. А. № 2007106661; заявл. 21.02.07; опубл. 27.12.08, Бюл. № 36. 3 с.
10. Казанцева Т. П. Исследования по изучению газопроницаемости соляных пород по образцам кернов геолого-разведочных скважин в условиях Романовского участка Верхнекамского месторождения // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2018. № 1. С. 333–336.
11. Асатов А. Ш. Экспериментальное исследование проницаемости горных пород по кривым выравнивания давления и оценка проницаемости забоя бурящейся скважины // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 10-1. С. 13–15.
12. Feng P., Dai F., Liu Y., Xu N., Zhao T. Effects of strain rate on the mechanical and fracturing behaviors of rock-like specimens containing two unparallel fissures under uniaxial compression // Soil dynamics and earthquake engineering. 2018. Vol. 110. P. 195–211. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.026>
13. Komurlu E. Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression // International journal of geo-engineering. 2018. P. 9–17. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>
14. Карманский А. Т. Коллекторские свойства горных пород при изменении вида напряженного состояния // Записки Горного института. 2009. Т. 183. С. 289–292.
15. Meng Q., Zhang M., Han L., Pu H., Chen Y. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression // Rock mechanics and rock engineering. 2018. Vol. 51, issue 4. P. 969–988. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1389-6>

Статья поступила в редакцию 03 июля 2019 года

The effect of cyclic changes in uniaxial compression value on the relative permeability of basalts and limestones

Sergey Viktorovich BIRYULIN,
Irina Anatol'evna KOZLOVA,
Anatoliy Konstantinovich YURKOV

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Relevance of the work. Changes in the structure of the elastic stress range of the deformable block of the earth's crust can determine the behavior of a number of indicators of upcoming seismic events. Therefore, an important issue is the study of changes in the structure of pore space under compression in order to understand the behavior of physical phenomena and processes that occur during the preparation of seismic events.

Purpose of the work: study of changes in the permeability of rock samples under uniaxial compression in the context of cyclically varying compressive stress.

Methodology of the study: design and assembly of the plant, followed by a series of experiments on rock samples of various compositions under uniaxial compression.

Results. This paper presents the results of a study of changes in pressure recovery in the ballast chamber, which characterizes the relative permeability, for andesite-basalt and limestone samples under cyclic uniaxial compression. The dependences of the change in permeability from the cyclic change in pressure on the sample are constructed.

Conclusions. Samples of andesite-basalt composition and limestones were studied. During the experiments it was found that with uniaxial compression of rock samples, changes in their permeability occur. In the vast majority of cases, with increasing pressure of the hydraulic press on the samples, their permeability decreased until a critical value was reached, after which the permeability began to increase until the sample was destroyed. It was found that the permeability of the studied limestone samples changes with an increase in the uniaxial compression in a different way compared with the andesite-basalt samples. They retain their permeability at the same level, right up to cracks formation. Samples of andesite-basalt composition are characterized by a return of permeability values during cyclic changes in pressure (pressure return to the initial level). The obtained result confirms the presence of elastic deformations in the studied andesite-basalt samples.

Keywords: uniaxial compression, elastic deformation, cyclic uniaxial compression, andesite-basalt, limestone, permeability.

REFERENCES

1. Dobrynin V. M., Wendelstein B. Yu., Kozhevnikov D. A. 1991, *Petrofizika* [Petrophysics]. Moscow, 368 p.
2. Sobolev G. A., Ponomarev A. V. 1999, Acoustic emission and fracture preparation stages in a laboratory experiment. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], No 4/5. P.50-62 (In Russ.)
3. Dakhnov V. N. 1975, *Geofizicheskiye metody opredeleniya kollektorskikh svoystv i neftegazonasyschennosti gornykh porod* [Geophysical methods for determining reservoir properties and oil and gas saturation of rocks], 334 p.
4. Malik A., Chakraborty T., Rao S. 2018, Strain rate effect on the mechanical behavior of basalt: observations from static and dynamic tests. *Thin-walled structures*. Vol. 126. P. 127–137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.014>
5. Biryulin S. V. 2018, *Izmeneniye pronitsayemosti gornykh porod v usloviyakh odnoosnogo szhatiya* [Change in rock permeability under uniaxial compression]. XIX Ural scientific school of geophysics for young researchers. Book of reports. P. 24–26.
6. Fedorova A. Ya. 2016, *Voprosy opredeleniya pronitsayemosti gornykh porod* [Rock permeability issues]. Oil and gas technologies and new materials. Problems and solutions. Book of reports. P. 311–316.
7. Utkin V. I., Yurkov A. K. 2009, Radon as a "determinate" indicator of natural and technogenic geodynamic processes. *Doklady akademii nauk* [Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections], Vol. 426, No 6. P. 816–820. (In Russ.)
8. Hashper A. L., Aminev T. R., Fedorov A. I., Zhonin A. V. 2019, Study of the dependence of rock permeability on its stress-strain state. *Geologicheskii vestnik* [Geological Bulletin], No 1, P. 133–140. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10>
9. 2008, *Ustroystvo dlya opredeleniya poristosti i pronitsayemosti obraztsov gornykh porod* [Device for determining the porosity and permeability of rock samples]. Patent Rf no 2342646.
10. Kazantseva T. P. 2018, Studies on the gas permeability of salt rocks from core samples of exploration wells in the conditions of the Romanovsky site of the Verkhnekamskoye field. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopayemykh* [Problems of development of hydrocarbon and ore mineral deposits], No1, P. 333-336. (In Russ.)
11. Asadov A. Sh. 2017, Experimental study of rock permeability from pressure equalization curves and an assessment of the permeability of the bottom of a drilled well. *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk* [Topical issues of the humanities and natural sciences]. No 10-1. P. 13–15. (In Russ.)
12. Feng P., Dai F., Liu Y., Xu N., Zhao T. 2018, Effects of strain rate on the mechanical and fracturing behaviors of rock-like specimens containing two unparallel fissures under uniaxial compression. *Soil dynamics and earthquake engineering*. Vol. 110. P. 195–211. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.026>
13. Komurlu E. 2018, Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. *International journal of geo-engineering*. P. 9–17. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>
14. Karmansky A. T. 2009, The reservoir properties of rocks when changing the type of stress state. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], vol. 183. P. 289–292. (In Russ.)
15. Meng Q., Zhang M., Han L., Pu H., Chen Y. 2018, Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression. *Rock mechanics and rock engineering*. Vol. 51, issue 4. P. 969–988. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1389-6>

The article was received on July 03, 2019

✉ serrega2009@gmail.com

🌐 <https://orcid.org/0000-0001-8115-8034>

✉ ikozlova75@mail.ru

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-0281-9218>

✉ akyurkov@mail.ru

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-6790-0340>