

УДК 622.023

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ПИРОКЛАСТИЧЕСКИХ ПОРОД
НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ МЕТОДОМ ТОЧЕЧНОЙ НАГРУЗКИ
ПОСЛЕ ЦИКЛОВ ЗАМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ**

Измаил Инс¹, Мехмет Кан Балчи², Мустафа Фенер³

¹Технический университет Коньи, 42250, Конья, Турция

²Университет Батмана, E-mail: mehmetcan.balci@batman.edu.tr,
72000, Батман, Турция

³Университет Анкары, 06830, Анкара, Турция

Рассмотрено изменение прочности пирокластических пород из Каппадокии после 5, 10, 15, 20 и 30 циклов заморозки и оттаивания путем определения абсолютных значений прочности и индекса сосредоточенной точечной нагрузки (PLT). Полученное эмпирическое соотношение для прогнозирования прочности на одноосное сжатие с помощью PLT-индекса имеет коэффициент корреляции 0.8663.

Пирокластические породы, Каппадокия, цикл заморозки и оттаивания, индекс точечной нагрузки, прочность на одноосное сжатие, оценка прочности

DOI: 10.15372/FTPRI20240308

EDN: LNVDQA

На протяжении столетий пирокластические породы использовались в качестве природного строительного камня благодаря простой обрабатываемости и транспортировке. Изначально в массивах пирокластических пород высекались помещения, а затем такие породы стали применяться в качестве строительного материала. Однако пирокластические породы крайне чувствительны к атмосферному воздействию, в результате которого ухудшаются их физические и механические свойства.

Основной причиной изменения механических свойств горных пород в регионах с господствующим континентальным климатом является циклический процесс заморозки и оттаивания (далее F-T цикл). Вследствие этого процесса происходит частичный или полный износ блоков из природного камня [1]. Пирокластические породы обладают низкой прочностью, поэтому F-T цикл приводит к быстрой потере целостности. Данное явление побудило многих исследователей рассмотреть изменение прочностных показателей [2–5] и структурных свойств [6–9] пирокластических пород после F-T цикла. Были установлены эмпирические соотношения для определения изменения прочности пород на одноосное сжатие (далее UCS) после заморозки и оттаивания [10, 11]. Изменение индекса сосредоточенной точечной нагрузки (PLT-индекс) для косвенной оценки UCS также рассматривалось во многих работах [12–14]. Выявлено, что PLT-индекс уменьшается при увеличении количества F-T циклов.

Для оценки дальнейшей применимости таких пород определяется PLT-индекс, по которому можно сделать вывод об их прочности на одноосное сжатие. В настоящей работе рассмотрено изменение PLT-индекса образцов пирокластических пород из разных областей Каппадокии после ряда F-T циклов и выполнена оценка значений UCS на основе полученных результатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для испытаний взяты 11 образцов пирокластических пород из заброшенных и действующих карьеров. Такие породы можно встретить в постройках исторических зданий, также они используются в Каппадокии при строительстве. Образцы приведены к стандартному размеру $30 \times 30 \times 30$ см. Места сбора образцов: № 1 — Demirciler/Aksaray; № 2 — Selime/Aksara; № 3 — Gümüşler/Niğd; № 4 — Koçcağız/Kayser; № 5 — Kuruköprü/Kayse; № 6 — Emmiler/Kayser; № 7 — Tomarza/Kayser; № 8 — Karayazı-1/Nevşehir; № 9 — Karayazı-2/Nevşehir; № 10 — Karayazı-3/Nevşehir; № 11 — Karayazı-4/Nevşehir.

Свойства образцов (плотность в сухом состоянии, пористость и скорость P -волны) определены по методам, рекомендованным ISRM [15]. Образцы для расчета UCS и PLT-индекса подготовлены по действующим стандартам [16, 17]. Затем каждый образец был разделен на шесть групп: из них одна группа — контрольная (F-T цикл не выполнялся) и пять групп, с которыми проведены 5, 10, 15, 20 и 30 F-T циклов, после чего получены значения UCS и PLT-индекса. Для определения UCS образцы приведены к диаметру 42 мм и соотношению длины к диаметру 2:1. Скорость нагружения находилась в диапазоне 0.5–1.0 МПа/с. За окончательное значение UCS принято среднее после испытаний пяти образцов. Затем полученные UCS скорректированы для эквивалентного диаметра 50 мм.

Образцы для определения PLT-индекса также приведены к диаметру 42 мм (размер зерна ВХ); соотношение высоты к диаметру составило 1:2. После определения PLT-индекса 10 образцов значения индекса скорректированы для эквивалентного диаметра 50 мм. Процесс заморозки и оттаивания выполнен по стандарту ASTM-D5312 [18]. Вначале образцы охлаждались в течение 12 ч при температуре -18 ± 2.5 °C, а затем нагревались также в течение 12 ч при температуре 32 ± 2.5 °C. Данный процесс определен как цикл заморозки и оттаивания (F-T цикл). Рассмотрено 5, 10, 15, 20 и 30 F-T циклов. Для определения минерального состава и структурных параметров подготовлены и проанализированы шлифы образцов согласно рекомендациям TS EN-12407 [19].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образцы собранных пирокластических пород относятся к неогеновому и четвертичному периодам [20] и принадлежат Каппадокийской вулканической области, которая простирается на 300 км с северо-востока на юго-запад в Центральную Анатолию и имеет ширину около 40 км [21]. Минералогические и петрографические свойства проанализированы с помощью оптического микроскопа, результаты анализа образцов показаны ниже:

- № 1 — 46 % Vg, 24 % P, 10 % Q, 10 % Rf, 10 % B, 1 % Om;
- № 2 — 50 % Vg, 25 % P, 9 % Q, 8 % Rf, 7 % B, 1 % Om;
- № 3 — 72 % Vg, 12 % P, 6 % Q, 5 % Rf, 4 % B, 1 % Om;
- № 4 — 83 % Vg, 10 % P, 6 % Q, 1 % Om;
- № 5 — 64 % Vg, 15 % P, 7 % Q, 7 % S, 4 % Rf, 2 % B, 1 % Om;
- № 6 — 54 % Vg, 20 % P, 10 % Rf, 7 % Pyr, 4 % S, 3 % Q, 2 % Om;
- № 7 — 68 % Vg, 20 % Rf, 12 % P;

№ 8 — 71 % Vg, 10 % P, 10 % Q, 8 % Rf, 1 % Om;

№ 9 — 73 % Vg, 12 % P, 7 % Q, 7 % Rf, 1 % Om;

№ 10 — 50 % Vg, 20 % P, 15 % C, 5 % Rf, 4 % Q, 4 % B, 2 % Om;

№ 11 — 46 % Vg, 20 % P, 15 % C, 10 % Rf, 4 % Q, 4 % B, 2 % Om.

Наименование породы приведено по классификации Шмидта (1981): В — биотит, С — карбонат, Om — опакующие минералы, P — плагиоклаз, Pyr — пироксен, Rf — обломки пород, S — санидин, Vg — вулканическое стекло, Q — кварц

В состав образцов входят: вулканическое стекло, плагиоклаз, обломки пород и кварцевые минералы. Основным компонентом является вулканическое стекло с весовой долей 46–83 %. Согласно классификации горных пород Шмидта, все породы относятся к вулканическому туфу и имеют витропорфировую структуру [22].

Физико-механические и прочностные свойства рассматриваемых образцов представлены в табл. 1. Пористость образцов находится в диапазоне 19.85–36.83 %. Согласно классификации пород по пористости NBG [23], образец № 5 относится к высокому классу, остальные образцы — к крайне высокому.

Плотность образцов в сухом состоянии имеет диапазон 1.30–1.82 г/см³, а скорость Р-волны — диапазон 2.02–2.95 км/с. Диапазон изменения прочности образцов на одноосное сжатие оказался весьма широким. Минимальное значение UCS зафиксировано у образца № 3, которое составило 7.57 МПа, а максимальное 48.63 МПа — у образца № 1. Значения PLT-индекса имеют диапазон 0.83–3.27 МПа. По классификации из стандарта ASTM D5731 [17] образец № 1 относится к крайне высокому классу прочности, образец № 9 — к среднему, а другие образцы — к высокому классу прочности.

ТАБЛИЦА 1. Значения PLT-индекса и прочности на одноосное сжатие контрольных образцов

Номер образца	n , %	ρ_d , г/см ³	V_p , км/с	PLT, МПа	UCS, МПа
1	23.89	1.75	2.95	3.27	48.63
2	24.81	1.54	2.30	1.23	10.55
3	36.83	1.30	2.02	1.03	7.57
4	25.27	1.63	2.58	1.94	31.57
5	19.53	1.78	2.28	2.79	48.38
6	26.21	1.82	2.69	2.68	36.64
7	33.05	1.42	2.90	1.88	28.27
8	21.09	1.75	2.45	1.02	16.86
9	28.45	1.54	2.49	0.83	24.51
10	30.76	1.66	2.19	1.24	15.68
11	32.20	1.58	2.20	1.18	12.36

Примечание: n — пористость; ρ_d — плотность в сухом состоянии; V_p — скорость Р-волны; PLT — индекс точечной нагрузки; UCS — прочность на одноосное сжатие

Изменение прочностных свойств образцов после F-T циклов и контрольных образцов представлено на рис. 1–4. Наиболее точное коррелирующее соотношение между PLT-индексом и количеством F-T циклов является квадратичным, значения коэффициента корреляции (R^2) приведены в табл. 2. Наименьший коэффициент корреляции ($R^2 = 0.6303$) зафиксирован у образца № 8, наибольший ($R^2 = 0.9459$) — у образца № 10.

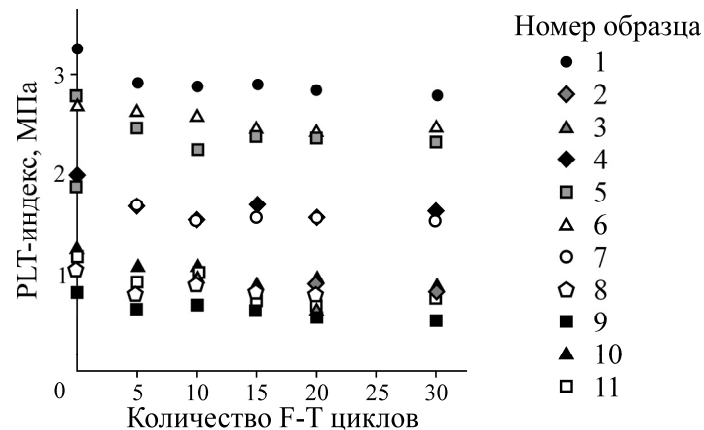
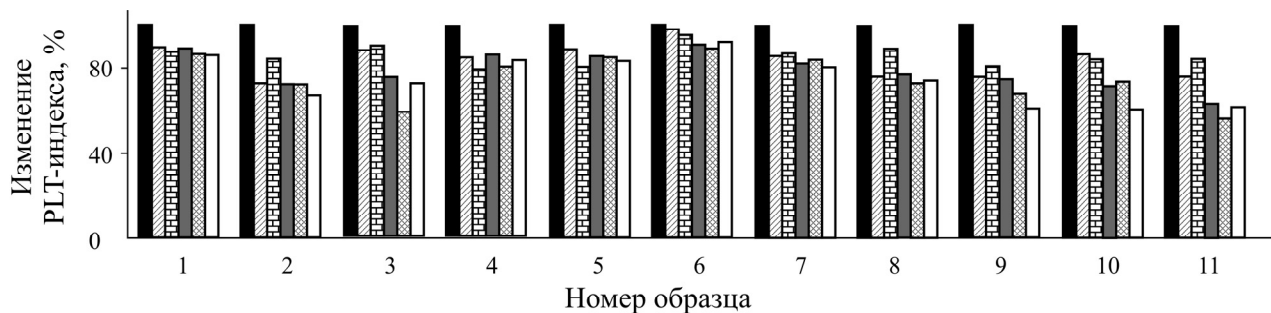


Рис. 1. Изменение PLT-индекса при увеличении количества F-T циклов

ТАБЛИЦА 2. Соотношения, описывающие изменение PLT-индекса после F-T циклов и коэффициенты их корреляции

Номер образца	Соотношение	R^2
1	$PLT = 0.0008x^2 - 0.0348x + 3.1925$	0.8074
2	$PLT = 0.0005x^2 - 0.0244x + 1.1590$	0.6927
3	$PLT = 0.0005x^2 - 0.0274x + 1.0544$	0.7747
4	$PLT = 0.0008x^2 - 0.0321x + 1.8737$	0.6804
5	$PLT = 0.0010x^2 - 0.0417x + 2.7199$	0.7349
6	$PLT = 0.0005x^2 - 0.0226x + 2.7113$	0.8935
7	$PLT = 0.0007x^2 - 0.0290x + 1.8196$	0.7885
8	$PLT = 0.0004x^2 - 0.0180x + 0.9751$	0.6303
9	$PLT = 0.0002x^2 - 0.0161x + 0.7873$	0.8371
10	$PLT = 0.0005x^2 - 0.0264x + 1.2290$	0.9459
11	$PLT = 0.0008x^2 - 0.0387x + 1.1660$	0.8240

Выявлено, что PLT-индекс уменьшается при увеличении количества F-T циклов. Также установлено, что PLT-индексы образцов (№ 8 и № 11), принадлежащих району Невшехир, изменяются аналогичным образом при изменении количества F-T циклов. Это обусловлено близким друг к другу минералогическим составом, структурой, показательными и прочностными свойствами.



Циклы: ■ Контрольный образец (без заморозания и оттаивания) ▨ 5 ▩ 10 ▤ 15 ▦ 20 □ 30

Рис. 2. Изменение PLT-индекса в зависимости от количества F-T циклов

Процентное изменение PLT-индекса после F-T циклов относительно начального значения (контрольные образцы) представлено на рис. 2. Видно, что с увеличением количества F-T циклов PLT-индекс в процентном отношении уменьшается на величину больше 10 %. Максимальное снижение PLT-индекса после F-T циклов 44.07 % зафиксировано у образца № 11, минимальное 10.07 % — у образца № 6.

Также проанализированы соотношения между UCS и количеством F-T циклов, наибольшие коэффициенты корреляции получены в полиномиальных выражениях (см. рис. 3 и табл. 3). Коэффициент корреляции для 11 образцов находится в диапазоне 0.7823 – 0.9767.

ТАБЛИЦА 3. Соотношения, описывающие изменение прочности после F-T циклов и коэффициенты их корреляции

Номер образца	Соотношение	R^2
1	$UCS = 0.0139x^2 - 0.8264x + 48.869$	0.7826
2	$UCS = 0.0030x^2 - 0.1645x + 10.626$	0.9612
3	$UCS = 0.0004x^2 - 0.0830x + 7.8292$	0.7823
4	$UCS = 0.0238x^2 - 1.1642x + 32.666$	0.9561
5	$UCS = 0.0080x^2 - 0.4307x + 49.092$	0.8951
6	$UCS = 0.0016x^2 - 0.2835x + 37.053$	0.8735
7	$UCS = 0.0081x^2 - 0.5320x + 28.421$	0.9135
8	$UCS = 0.0049x^2 - 0.3765x + 16.827$	0.9767
9	$UCS = 0.0203x^2 - 1.2874x + 25.153$	0.9376
10	$UCS = -0.0103x^2 - 0.0207x + 15.507$	0.9735
11	$UCS = -0.0014x^2 - 0.1550x + 12.430$	0.9161

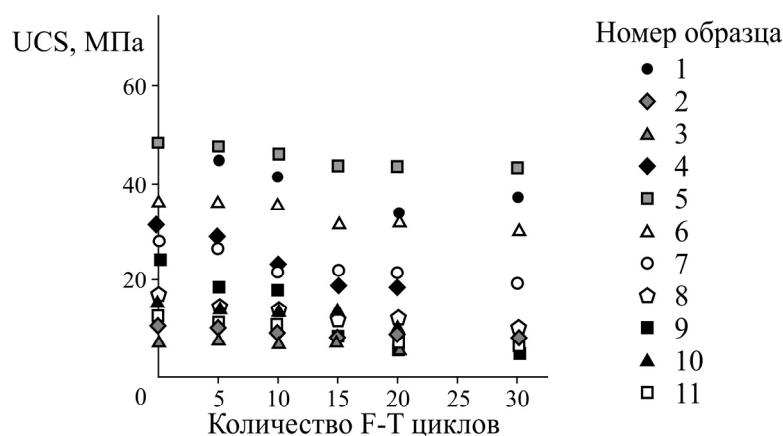


Рис. 3. Изменение прочности при увеличении количества F-T циклов

В результате анализа выявлено, что процентное изменение UCS после F-T циклов согласуется с процентным изменением PLT-индекса (рис. 4). Зафиксировано меньшее снижение UCS после первых пяти F-T циклов. По данным изменениям можно установить зависимость между значениями PLT-индекса и UCS.

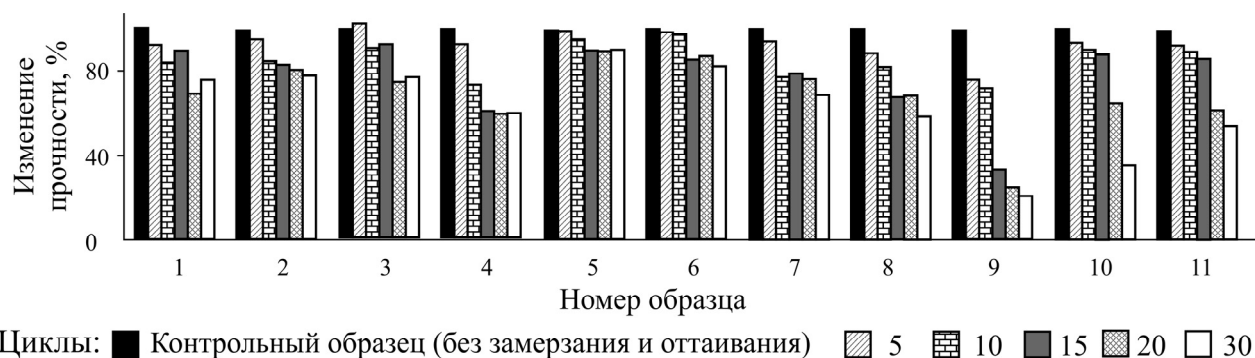


Рис. 4. Изменение прочности образцов в зависимости от количества F-T циклов

Соотношение между UCS и PLT-индексом для контрольных образцов и после F-T циклов проанализировано методом статистической регрессии (линейной, показательной, экспоненциальной, логарифмической и квадратной). Анализ выполнен в ПО SPSS v.21 (Statistical Package for the Social Sciences — Статистический пакет для гуманитарных наук). Достоверность полученных уравнений проверена по критерию Стьюдента (t -тест) и критерию Фишера (F-тест). Статистическое описание модели с наибольшей корреляцией (0.8663) представлено на рис. 5. Результаты дисперсионного анализа ANOVA для этой модели приведены в табл. 4.

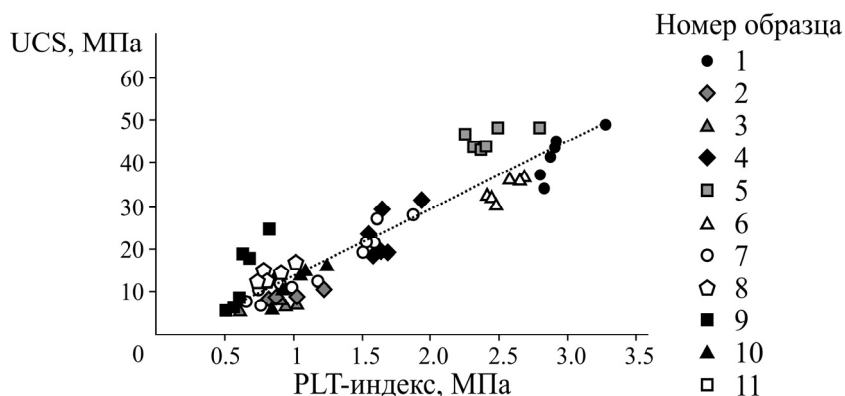


Рис. 5. Соотношение между значениями UCS и PLT-индекса до и после F-T циклов

ТАБЛИЦА 4. Результаты анализа ANOVA модели простой регрессии для оценки значений прочности

Модель	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	R^2	F	p
Регрессия	10385.775	1	10385.775	0.8663	414.681	0.000
Остаток	1602.892	64	25.045	—	—	—
Итого	11988.666	65	—	—	—	—

На рис. 6 показано соотношение между спрогнозированными значениями UCS с помощью простой статистической регрессии и полученными экспериментально. Видно, что значения распределяются в окрестностях линии $y=x$. Коэффициент корреляции составил 0.8663. Эффективность данного соотношения обусловлена широким диапазоном значений прочности образцов. Таким образом, полученное соотношение позволяет выполнять оценку прочности пирокластических пород до и после циклов заморозания и оттаивания.

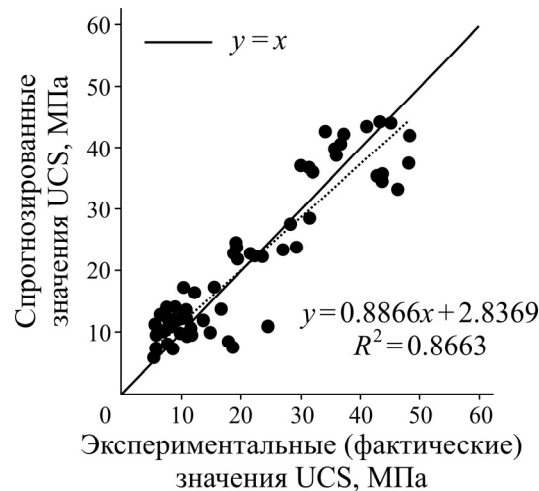


Рис. 6. Соотношение между экспериментальными и спрогнозированными значениями прочности рассматриваемых образцов

ВЫВОДЫ

Пирокластические породы широко применяются в качестве строительных материалов благодаря простоте их обработки. Такие материалы обладают рядом практических ограничений: чувствительностью к замерзанию и оттаиванию (F-T цикл), а также сложностью подготовки образцов для определения прочности на одноосное сжатие. Рассмотрена применимость метода сосредоточенной точечной нагрузки (PLT) для определения прочности пород на одноосное сжатие UCS после нескольких F-T циклов и получены следующие выводы: после первого F-T цикла наблюдается наиболее значительное изменение PLT-индекса: он уменьшается при увеличении количества F-T циклов, а соответствующая кривая аппроксимации является полиномиальной. Полученное соотношение для прогнозирования прочности на одноосное сжатие имеет высокий коэффициент корреляции $R^2=0.8663$ и позволяет определять изменения прочности пирокластических пород после F-T циклов на основе PLT-индекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fener M. and İnce İ.** Effects of the freeze–thaw (F–T) cycle on the andesitic rocks (Sille-Konya/Turkey) used in construction building, *J. Afr. Earth. Sci.*, 2015, Vol. 109. — P. 96–106.
2. **Chen T. C, Yeung M. R, and Mori N.** Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action, *Cold. Regions. Sci. Technol.*, 2004, Vol. 38. — P. 127–136.
3. **Özbek A.** Investigation of the effects of wetting–drying and freezing–thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2014, Vol.73, No. 2. — P. 595–609.
4. **Akın M., Özvan A., Dinçer İ., and Topal T.** Evaluation of the physico-mechanical parameters affecting the deterioration rate of Ahlat ignimbrites (Bitlis, Turkey), *Environ. Earth Sci.*, 2017, Vol.76, No. 24. — P. 1–22.
5. **Akbulut Z. F.** Investigation of the change in physical, mechanical, and microstructural properties of Ahlat ignimbrites under the effect of environment and freeze-thawing, *Arabian J.Geosci.*, 2022, Vol. 15, No. 6. — P. 1–11.
6. **Török, Á., Forgó, L. Z., Vogt, T., Löbens, S., Siegesmund, S., Weiss, T.,** The influence of lithology and pore-size distribution on the durability of acid volcanic tuffs, Hungary, *Geol. Soc.*, 2007, Vol. 271, No. 1. — P. 251–260.

7. **Momeni A., Abdilor Y., Khanlari G. R., Heidari M., and Sepahi A. A.** The effect of freeze–thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016, Vol. 75, No. 4. — P. 1649–1656.
8. **Hashemi M., Khabbazi Basmenj A., and Banikheir M.** Engineering geological and geoenvironmental evaluation of UNESCO World Heritage Site of Meymand rock-hewn village, Iran, *Environ. Earth Sci.*, 2018, Vol. 77, No. 1. — P. 1–23.
9. **Sun Y., Zhai C., Xu J., Cong Y., Qin L., and Zhao C.** Characterisation and evolution of the full size range of pores and fractures in rocks under freeze-thaw conditions using nuclear magnetic resonance and three-dimensional X-ray microscopy, *Eng. Geol.*, 2020, Vol. 271. — P. 105616.
10. **Liu Q., Huang S., Kang Y., and Liu X.** A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze–thaw, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2015, Vol. 120. — P. 96–107.
11. **İnce İ. and Fener M.** A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated pyroclastic rocks due to freeze–thaw cycle, *J. Afr. Earth. Sci.*, 2016, Vol. 120. — P. 134–140.
12. **Altindag R., Alyildiz I. S., and Onargan T.** Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze–thaw cycles, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, Vol. 41, No. 6. — P. 1023–1028.
13. **İnce İ.** Effect of freezing-thawing cycle on engineering parameters of rock, In *SÜ Graduate School of Natural Sci.* (p. 197). (in Turksh), 2013.
14. **Uğur İ. and Toklu H. Ö.** Effect of multi-cycle freeze-thaw tests on the physico-mechanical and thermal properties of some highly porous natural stones, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2020, Vol. 79, No. 1. — P. 255–267.
15. **ISRM**, The complete ISRM suggested Methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. (in Ulusay R, Hudson J Eds), *Int. Soc. Rock Mech., Commission on Testing Methods*, Ankara, Turkey, 2007.
16. **ASTM D7012**, Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, *Am. Soc. Testing and Materials*, West Conshohocken, 2014.
17. **ASTMD5731**, Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications, *Am. Soc. Testing and Materials*, West Conshohocken, 2008.
18. **ASTM D5312**, Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under freezing and thawing conditions, *Am. Soc. Testing and Materials*, West Conshohocken, 2004.
19. **TS EN-12407**, Natural stone test methods — petrographic examination, 2019, Ankara: Turkish Standards Institution, 2019.
20. **Toprak V., Keller J., and Schumacher R.** Volcano-tectonic features of the Cappadocian volcanic province, *Int. volcanological congress-excursion guide*, Middle East Technical University, Ankara, 1994.
21. **Toprak V.** Vent distribution and its relation to regional tectonics, *Cappadocian Volcanics*, Turkey, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1998, Vol. 85, No. 1–4. — P. 55–67.
22. **Schmid R.** Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the international union of geological sciences subcommission on the systematics of igneous rocks, *Geol.*, 1981, Vol. 9. — P. 41–43.
23. **NBG**, Engineering Geology and Rock Engineering: Norwegian Group of Rock Mechanics, Fornebu, Norway, 1985.

Поступила в редакцию 31/I 2023

После доработки 10/V 2024

Принята к публикации 17/V 2024