УДК 622.23.02

Е.В. Захаров, А.С. Курилко

ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦИКЛОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ

Аннотация. Установлены закономерности изменения внешней и полной удельных поверхностей известняка и кимберлита ряда алмазных месторождений Якутии под влиянием знакопеременного температурного воздействия. Исследовали образцы горных пород двух классов крупности: –20+10 мм и –2+1 мм. Внешнюю удельную поверхность образцов крупностью –20+10 мм определяли с помощью гранулометрического анализа. Под воздействием 10 циклов замораживания-оттаивания в водной среде, внешняя поверхность карбонатных пород трубки «Удачная» и трубки «Айхал» увеличивается в 3—12 раз. Внешняя поверхность кимберлита трубки «Интернациональная» и трубки «Мир» увеличивается в 8—14 раз. Полную удельную поверхность образцов крупностью –2+1 мм определяли многоточечным методом БЭТ на приборе «Сорбтометр-М». Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что под воздействием 5—10 циклов замораживания-оттаивания в водной среде, полная удельная поверхность образцов кимберлита трубки «Удачная» увеличивается на 38%, карбонатных пород трубки «Удачная» (доломит, доломитизированный известняк, известняк) увеличивается на 2—12%, а полная удельная поверхность образцов известняка карьера «Мохсоголлох» увеличивается на 5%. Интенсивность образования как внешней, так и полной удельной поверхности образцов зависит от среды, в которой происходит насыщение и замораживание образцов, пористости, минерального состава горной породы, а также масштабного фактора. Полученные результаты помогут понять механизм образования, зарождения и распространения дефектной структуры горных пород под действием знакопеременного температурного воздействия, приводящих в конечном итоге к дезинтеграции горных пород.

Ключевые слова: циклы замораживания-оттаивания, кимберлит, дезинтеграция, удельная поверхность, метод БЭТ, разрушение.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-31-38

Значительное снижение энергоемкости разрушения карбонатных горных пород, а также снижение их прочностных показателей под влиянием знакопеременного температурного воздействия, показали исследования проведенные в ИГДС СО РАН [1—4]. В ходе дальнейших работ были проведены исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на изменение полной и внешней удельной поверхности горных пород — показателей, напрямую связанных с энергетическими характеристиками разрушения пород.

Разрушение горных пород — это процесс образования новых поверхностей: суммарной и удельной. Они являются главным показателями характеризующими расход энергии на разрушение породы. От количества затрачиваемой энергии зависит степень изменения агрегатного состояния породы, так как работа, затраченная на ее разрушение, пропорциональна вновь образованной поверхности измельчаемого материала. В конечном итоге процесс разрушения сопровождается образованием фракций различной формы и крупности.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 31–38.
© Е.В. Захаров, А.С. Курилко. 2018.

Определение удельной поверхности горных пород проводили двумя методами для различной крупности горных пород:

- класс крупности –20+10 мм исследовался гранулометрическим анализом, так определяли внешнюю удельную поверхность — суммарную поверхность частиц, содержащихся в единице объема или массы тела;
- класс крупности –2+1 мм исследовался 5-и точечным методом БЭТ, в результате определяли полную удельную поверхность образцов с учетом поверхности открытых пор внутри частиц, раковин и трещин материала и т.д.

Внешняя удельная поверхность образцов крупностью –20+10 мм

Влияние циклов замораживания-оттаивания на внешнюю удельную поверхность горных пород крупностью –20+ +10 мм, исследовали на известняках трубок «Удачная» и «Айхал», а также кимберлитах трубок «Интернациональная» и «Мир». Исследуемые породы подвергали воздействию 3, 5 и 10 циклов замораживания-оттаивания в водной среде и 5% солевом растворе. После воздействия заданного количества циклов образцы вынимали из соответствующих сред, высушивали и проводили гранулометрический анализ.

Ситовой анализ показал, что уже после 3 циклов замораживания-оттаивания в 5% солевом растворе и водной среде, известняк трубки «Удачная» дезинтегрируется на 30% и 60% соответственно (рис. 1). С каждым последующим воздействием циклов замораживания-оттаивания дезинтеграция материала увеличивается.

На рис. 2 приведен ситовой анализ кимберлита трубки «Интернациональная» после воздействия циклов замораживания-оттаивания в водной среде, из которого следует, что воздействие первых 3-х циклов приводит к дезинтеграции 70% исходного материала. В дальнейшем после 5 и 10 циклов замораживания-оттаивания в исходном классе крупности (–20+10 мм) остается лишь 20% первоначального материала. Дезинтеграция кимберлита трубки «Интернациональная» в 5% солевом растворе проходит менее интенсивно, чем в водной среде. После

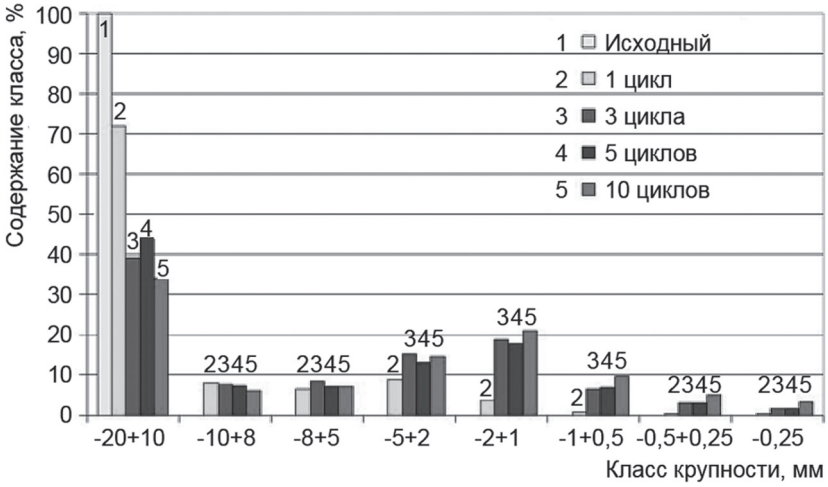

Рис. 1. Известняк трубки «Удачная». Ситовой анализ после циклов замораживания-оттаивания в водной среде

Fig. 1. Udachnaya Pipe limestone. Screen test after cyclic freezing–thawing in aqueous medium

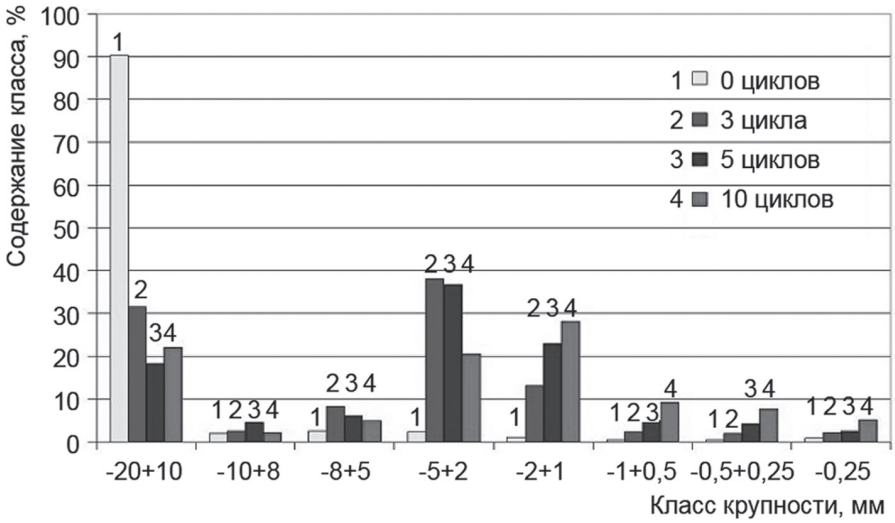

Рис. 2. Кимберлит трубки «Интернациональная». Ситовой анализ после циклов замораживания-оттаивания в водной среде

Fig. 2. Internatsionalnaya Pipe kimberlite. Screen test after cyclic freezing–thawing in aqueous medium

3 циклов замораживания-оттаивания 60% исходного материала дезинтегрировано.

Ситовой анализ кимберлита трубки «Мир» показал, что под воздействием первых 3 циклов замораживания-оттаивания, около 80% исходного материала дезинтегрируется вне зависимости от среды, в которой происходило насыщение и замораживание образцов.

По данным гранулометрического анализа рассчитывали вновь образованную внешнюю удельную поверхность образцов (м²/г). При расчетах форма частиц принималась шарообразной.

$$S_{уд} = \frac{1}{M_n}\left(\frac{6}{\rho_0}\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{M_i}{d_i} - 6\cdot\sqrt[3]{\left(\frac{M_n}{\rho_0}\right)^2}\right)$$

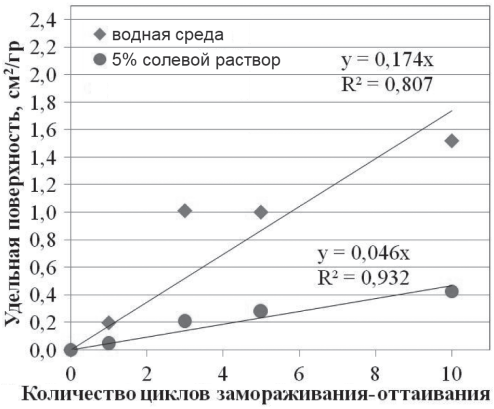

Рис. 3. Внешняя удельная поверхность известняка трубки «Удачная» образованная после циклов замораживания-оттаивания

Fig. 3. External specific surface formed on Udachnaya Pipe limestone after cyclic freezing–thawing

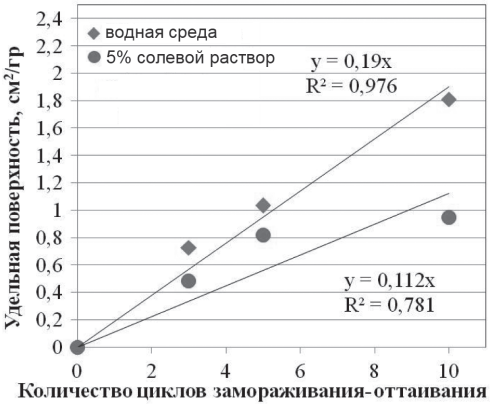

Рис. 4. Внешняя удельная поверхность известняка трубки «Айхал» образованная после циклов замораживания-оттаивания

Fig. 3. External specific surface formed on Aykhal Pipe limestone after cyclic freezing–thawing

где $d_i = 0,5*(d_i + d_{i+1})$ — средний размер класса массой M_i, мм; ρ_0 — плотность породы, кг/м^3; M_n — масса исходного образца породы, кг.

Результаты расчета внешней площади известняков трубок «Удачная» и «Айхал» образованной под действием циклов замораживания-оттаивания приведены на рис. 3, 4. Воздействие циклов замораживания-оттаивания на исследуемые образцы происходит сильнее в водной среде, чем в 5% солевом растворе.

На рис. 5—6 видно, что по сравнению с известняками, в кимберлитах внешняя удельная поверхность, образованная под действием циклов в водной среде незначительно превышает поверхность, образованную в 5% солевом растворе. В среднем, прирост удельной поверхности у кимберлитов выше, чем у известняков, что объясняется их более высокой пористостью.

Под воздействием 10 циклов замораживания-оттаивания в водной среде, внешняя поверхность карбонатных пород трубки «Удачная» и трубки «Айхал» увеличивается с 0,15 до 0,43—1,81 см^2/г соответственно. Внешняя поверхность кимберлита трубки «Интернациональная» и трубки «Мир» увеличивается с 0,14 до 1,2—2,03 см^2/г.

Основным механизмом разрушения горных пород, в данном случае, является многократное расклинивающее действие льда, образующегося при замерзании влаги содержащейся в порах породы, а также различием в упругих свойствах и коэффициентах теплового расширения отдельных зерен слагающих породу.

Полная удельная поверхность образцов крупностью –2+1 мм

В настоящее время, повысить скорость, точность и качество определения полной удельной поверхности исследуемых образцов можно используя высокопроизводительные автоматические газовые анализаторы, также существует возможность применения рентгеновской томографии [5, 6]. Измерение образцов крупностью –20+10 мм в анализаторах крайне затруднено вследствие их размеров, поэтому экспериментальные исследования по установлению влияния циклов замораживания-оттаивания на полную удельную поверхность горных пород, были проведены с образцами крупностью –2+1 мм. Исследовались

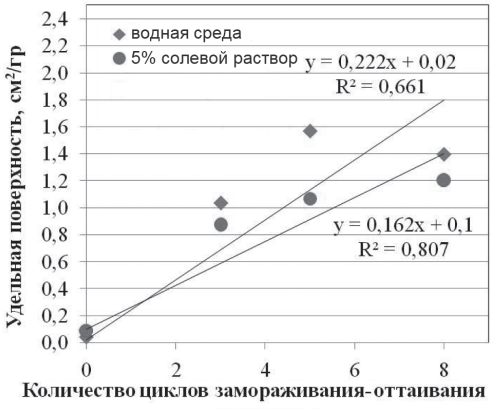

Рис. 5. Внешняя удельная поверхность кимберлита трубки «Мир» образованная после циклов замораживания-оттаивания

Fig. 3. External specific surface formed on Mir Pipe limestone after cyclic freezing–thawing

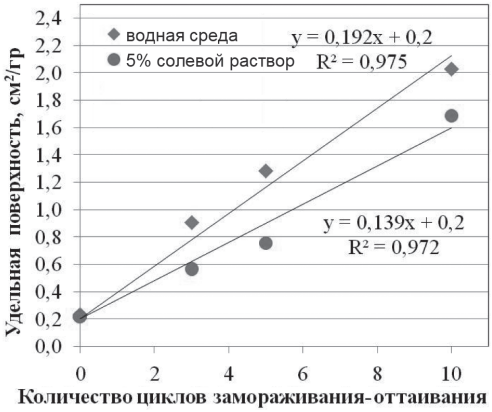

Рис. 6. Внешняя удельная поверхность кимберлита трубки «Интернациональная» образованная после циклов замораживания-оттаивания

Fig. 3. External specific surface formed on Internatsional'naya Pipe limestone after cyclic freezing–thawing

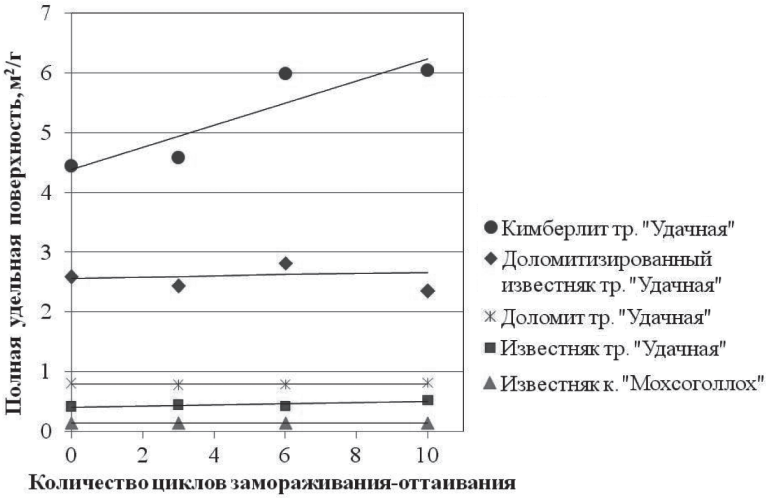

Рис. 7. Полная удельная поверхность образцов горных пород в зависимости от числа циклов замораживания-оттаивания

Fig. 7. Total specific surface of rock specimens versus freezing–thawing cycles

следующие породы: доломит, известняк и доломитизированный известняк с бортов карьера «Удачный» АК «АЛРОСА»; известняк карьера «Мохсоголлох»; кимберлит трубки «Удачная».

Полная удельная поверхность (внешняя поверхность с учетом поверхности открытых пор внутри частиц, раковин и трещин материала и т.д.) измерялась 5 точечным методом БЭТ на анализаторе удельной поверхности Сорбтометр-М.

Исследуемый материал дробили и просеивали для выделения класса крупности –2+1 мм, затем отмывали от глинистых включений. Далее из просеянной и усредненной пробы путем квартования формировали навески для проведения испытаний, каждая массой около 3,5—4 гр. (ограничивалась объемом измерительной ячейки). Образцы выстаивали в дистиллированной воде в течение двух суток для насыщения пор, а затем помещали в морозильную камеру при температуре –20 °С.

Исследуемые образцы пород подвергали воздействию 3, 6 и 10 циклов замораживания-оттаивания. После воздействия 3 циклов, образцы высушивали до постоянной массы, и дегазировали в станции анализатора Сорбтометр-М. Затем 5 точечным методом БЭТ измеряли удельную поверхность, образованную в результате воздействия 3 циклов замораживания-оттаивания. После проведенного анализа образцы вновь насыщали дистиллированной водой в течение 2 суток, и по окончанию времени насыщения в соответствии с программой экспериментов вновь подвергали воздействию заданного количества циклов замораживания-оттаивания. Результаты проведенного эксперимента показаны на рис. 7.

Экспериментальными исследованиями установлено, что под воздействием 10 циклов замораживания-оттаивания в водной среде, полная удельная поверхность образцов кимберлита трубки «Удачная» увеличивается на 40% (с 4,4 м^2/г до 6,1 м^2/г), карбонатных пород трубки «Удачная» (доломит, доломитизированный известняк, известняк) увеличивается на 2—12%, а полная удельная поверхность образцов известняка карьера «Мохсоголлох» увеличивается на 5% (с 0,132 м^2/г до 0,139 м^2/г).

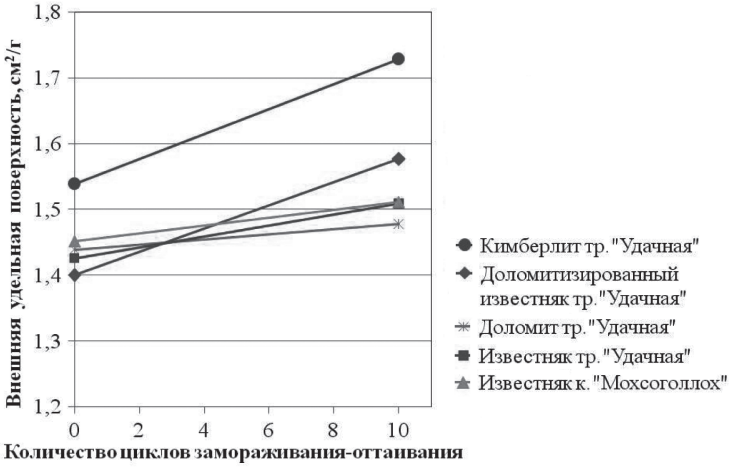

Рис. 8. Внешняя удельная поверхность образцов горных пород в зависимости от числа циклов замораживания-оттаивания

Fig. 8. External specific surface of rock specimens versus freezing–thawing cycles

Для определения отношения полной удельной поверхности к внешней, у исследованных образцов при помощи гранулометрического анализа была рассчитана внешняя поверхность частиц в исходном состоянии и после воздействия 10 циклов замораживания-оттаивания в водной среде. Результаты расчетов внешней поверхности приведены на рис. 8.

Несмотря на то, что внешняя поверхность (рис. 8) в десятки тысяч раз меньше, чем полная поверхность (рис. 7) воздействие циклов замораживания-оттаивания приводит к росту внешней поверхности образцов кимберлита трубки «Удачная» на 12% (с 1,53 см^2/г до 1,72 см^2/г). На 12% увеличивается поверхность доломитизированного известняка трубки «Удачная» (с 1,4 см^2/г до 1,57 см^2/г), у остальных образцов наблюдается рост внешней поверхности в пределах 5%.

Таким образом, в заданном диапазоне крупности, воздействие циклического замораживания-оттаивания приводит к росту полной поверхности исследованных пород, в основном за счет увеличения пористой структуры образцов (роста пор, раковин, трещин и пустот и т.д. [5, 6]). Прирост внешней поверхности образцов по отношению к полной поверхности незначителен.

Заключение

Экспериментальными исследованиями установлены закономерности изменения внешней и полной удельной поверхности карбонатных пород и кимберлита алмазных месторождений Якутии под влиянием знакопеременного температурного воздействия. Интенсивность образования удельной поверхности зависит от условий насыщения и замораживания образцов, начальной пористости [7, 8] и прочности [9, 10], количества циклов замораживания-оттаивания, вещественного состава пород [11], а также масштабного фактора [12].

Полученные данные помогут понять механизм зарождения и распространения дефектной структуры горных пород под воздействием знакопеременных температур. Что в конечном итоге позволит разработать эффективную технологию добычи и переработки минерального сырья в условиях криолитозоны, основанную на использовании естественных климатических факторов Сервера [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Курилко А. С.*, *Попов В. И.*, *Захаров Е. В.* Знакопеременные температурные воздействия как фактор энергосбережения для технологий комплексной подготовки рудного сырья в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 5. — С. 84—92.

2. *Захаров Е. В.*, *Курилко А. С.* Локальный минимум энергоемкости разрушения скальных пород в диапазоне отрицательных температур // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 2. — С. 94—98.

3. *Zakharov E. V.*, *Kurilko A. S.* Effects of low temperatures on strength and power input into rock failure // Science in cold and arid regions, 2014, Vol. 6, issue 5, pp. 455—460.

4. *Захаров Е. В.* Экспериментальные исследования удельной энергоемкости разрушения карбонатных пород под действием циклов замораживания-оттаивания // Наука и образование. — 2017. — № 3. — С. 82—85.

5. *Вайсберг Л. А.*, *Каменева Е. Е.* Взаимосвязь структурных особенностей и физико-механических свойств горных пород // Горный журнал. — 2017. — № 9. — С. 53—58.

6. *Вайсберг Л. А.*, *Каменева Е. Е.* Изменение структуры горных пород при цикличном замораживании и оттаивании // Обогащение руд. — 2015. — № 2. — С. 28—31.

7. *Zhou Keping, Li Bin, Li Jie-lin, Deng Hong-Wei, Bin Feng*. Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze–thaw environment // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2015. Vol. 25. Issue 4. pp. 1254—1261.

8. *Lubera E.* Frost weathering of selected rocks in the Tatra Mountains // Quaestiones Geographicae. 2014. 33(1). Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, pp. 75—88.

9. *Freire-Lista D. M., Fort R.*, Varas-*Muriel M. J.* Freeze–thaw fracturing in building granites // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 113. pp. 40—51.

10. *Fener Mustafa, İnce İsmail*. Effects of the freeze–thaw (F–T) cycle on the andesitic rocks (Sille-Konya/Turkey) used in construction building // Journal of African Earth Sciences. 2015. Vol. 109. pp. 96—106.

11. *Lamp J. L.*, *Marchant D. R.*, *Mackay S. L.*, *Head J. W.* Thermal stress weathering and the spalling of Antarctic rocks // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2016. 121. pp. 1—22.

12. *Федотов П. К.* Эмпирическая зависимость предела прочности горных пород от размеров их кусков при дезинтеграции в поршневом прессе // Вестник иркутского государственного технического университета. — 2014. — № 12(95). — С. 92—97. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Захаров Евгений Васильевич[1] — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru
Курилко Александр Сардокович[1] — доктор технических наук,
зав. лабораторией, заместитель директора ИГДС СО РАН,
e-mail: a.s.kurilko@igds.ysn.ru,
[1] Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 12, pp. 31–38.

Change of specific surface of rocks under cyclic freezing—thawing

Zakharov E.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru,
Kurilko A.S.[1], Doctor of Technical Sciences,
Head of Laboratory, Deputy Director, e-mail: a.s.kurilko@igds.ysn.ru,
[1] Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences,
677018, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia.

Abstract. The mechanisms of change in external and total specific surfaces under alternating thermal forces are determined for limestone and kimberlite from a few diamond deposits in Yakutia. The test specimens of rocks differed in grain sizes by an order of magnitude: -20+10 mm and -2+1 mm. The external specific surface of the specimens with the grain size of -20+10 mm was determined by the grain size analysis. After 10 cycles of freezing–thawing in aqueous medium, the external surface of carbonate-bearing rocks from Udachnaya and Aikhal Pipes increased by 3–12 times. The external surface of kimberlite from Internatsionalnaya and Mir Pipes enlarged by 8–14 times. The total specific surface of the specimens with the grain size of -2+1 mm was estimated using the BET method on Sorbtometr-M analyzer. The tests show that after 5–10 cycles of freezing–thawing in aqueous medium, the increase in the total specific surface makes 38% for kimberlite from Udachnaya Pipe, 2–12% for carbonate-bearing rocks from Udachnaya Pipe (dolomite, dolomitic limestone, limestone) and 5% for limestone from the Mokhsogollokh surface mine. The intensity of formation both of external and total specific surfaces depends on the saturation and freezing medium, porosity and mineral composition of rocks and on the scale factor. The research findings help understand the mechanism of initiation and growth of structural defects in rocks under alternating thermal forces, which finally result in total disintegration.

Key words: Freezing–thawing cycles, kimberlite, disintegration, specific surface, BET method, failure.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-31-38

REFERENCES

1. Kurilko A. S., Popov V. I., Zakharov E. V. Znakoperemennye temperaturnye vozdeystviya kak faktor energosberezheniya dlya tekhnologiy kompleksnoy podgotovki rudnogo syr'ya v usloviyakh kriolitozony [Alternating thermal effect as a factor of energy saving for the technologies of integrated ore pretreatment under conditions of permafrost], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 84—92. [In Russ].

2. Zakharov E. V., Kurilko A. S. Lokal'nyy minimum energoemkosti razrusheniya skal'nykh porod v diapazone otritsatel'nykh temperatur [Local minimum of energy consumption of hard rock destruction in negative temperature range], *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no 2, pp. 94—98. [In Russ].

3. Zakharov E. V., Kurilko A. S. Effects of low temperatures on strength and power input into rock failure], *Science in cold and arid regions*, 2014, Vol. 6, issue 5, pp. 455—460.

4. Zakharov E. V. Eksperimental'nye issledovaniya udel'noy energoemkosti razrusheniya karbonatnykh porod pod deystviem tsiklov zamorazhivaniya-ottaivaniya [Experimental research of energy consumption of carbonate-bearing rocks under cyclic freeze and thaw], *Nauka i obrazovanie*. 2017, no 3, pp. 82—85. [In Russ].

5. Vaysberg L. A., Kameneva E. E. Vzaimosvyaz' strukturnykh osobennostey i fiziko-mekhanicheskikh svoystv gornykh porod [Interaction between structural features and physical–mechanical properties of rocks], *Gornyy zhurnal*. 2017, no 9, pp. 53—58. [In Russ].

6. Vaysberg L. A., Kameneva E. E. Izmenenie struktury gornykh porod pri tsiklichnom zamorazhivanii i ottaivanii [Structural changes in rocks under cyclic freezing and thawing], *Obogashchenie rud*. 2015, no 2, pp. 28—31. [In Russ].

7. Zhou Keping, Li Bin, Li Jie-lin, Deng Hong-Wei, Bin Feng. Microscopic damage and dynamic mechanical properties of rock under freeze–thaw environment, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015. Vol. 25. Issue 4. pp. 1254—1261.

8. Lubera E. Frost weathering of selected rocks in the Tatra Mountains, *Quaestiones Geographicae*. 2014. 33(1). Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, pp. 75—88.

9. Freire-Lista D. M., Fort R., Varas-Muriel M. J. Freeze–thaw fracturing in building granites, *Cold Regions Science and Technology*. 2015. Vol. 113. pp. 40—51.

10. Fener Mustafa, İnce İsmail. Effects of the freeze–thaw (F–T) cycle on the andesitic rocks (Sille-Konya/Turkey) used in construction building], *Journal of African Earth Sciences*. 2015. Vol. 109. pp. 96—106.

11. Lamp J. L., Marchant D. R., Mackay S. L., Head J. W. Thermal stress weathering and the spalling of Antarctic rocks], *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2016. 121. pp. 1—22.

12. Fedotov P. K. Empiricheskaya zavisimost' predela prochnosti gornykh porod ot razmerov ikh kuskov pri dezintegratsii v porshnevom presse [Empirical curve of strength and size of rock particles under disintegration by piston pressing], *Vestnik irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014, no 12(95), pp. 92—97. [In Russ].