

Оценка степени нарушенности образцов каменной соли при их циклическом деформировании (по данным терморациметрических измерений)

Д. И. Блохин[✉], Е. Б. Черепецкая

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва,

Российская Федерация

✉ dblokhin@yandex.ru

Резюме. Исследуется возможность получения информации о росте нарушенности геоматериалов, вызванном интенсификацией протекающих в них деформационных процессов, по вариациям интенсивности сопутствующего ИК-излучения. Представлены результаты экспериментов по регистрации теплового излучения с поверхности образцов каменной соли при близких к предельным режимам периодического нагружения в условиях одноосного сжатия. Показана качественная идентичность записей механических параметров и вариаций ИК-излучения, характеризующих изменения напряженно-деформированного состояния испытываемых образцов горных пород. Установлено, что фиксируемые изменения угла наклона зависимостей интенсивности теплового излучения с поверхности образцов каменной соли от продольной деформации на участках роста нагрузки при высокоамплитудном периодическом воздействии подобны изменениям значений модуля деформации E , рассчитываемых аналогичным образом на соответствующих участках диаграмм напряжение – деформация. Сделан вывод о возможности использования результатов бесконтактных терморациметрических измерений, а именно данных об изменениях значений угла наклона указанных кривых в качестве индикатора степени нарушенности геоматериалов.

Ключевые слова: геоматериалы, циклическое нагружение, напряжения, деформации, нарушенность, тепловое излучение

Для цитирования: Блохин Д.И., Черепецкая Е.Б. Оценка степени нарушенности образцов каменной соли при их циклическом деформировании (по данным терморациметрических измерений). *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 47-52. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-47-52>.

Assessment of the degree of damage to rock salt samples during their cyclic deformation (based on thermoradiation measurements)

D. I. Blokhin[✉], E. B. Cherepetskaya

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

✉ dblokhin@yandex.ru

Abstract. The possibility of obtaining information on the increase in disturbance of geomaterials caused by the intensification of deformation processes occurring in them is investigated by variations in the intensity of concomitant IR radiation. The results of experiments on the registration of thermal radiation from the surface of rock salt samples under conditions of uniaxial compression close to the limit conditions of periodic loading are presented. The qualitative identity of the recordings of mechanical parameters and variations of IR radiation characterizing changes in the stress-strain state of the tested rock samples is shown. It has been established that the recorded changes in the angle of inclination of the dependences of the intensity of thermal radiation from the surface of rock salt samples on longitudinal deformation in areas of load growth under high-amplitude periodic exposure are similar to changes in the values of the deformation modulus E , calculated in the same way in the corresponding sections of the stress-strain diagrams. It is concluded that it is possible to use the results of non-contact thermoradiometric measurements, namely, data on changes in the angle of inclination of these curves as an indicator of the degree of disturbance of geomaterials.

Keywords: geomaterials, cyclic loading, stresses, deformations, disturbance, thermal radiation

For citation: Blokhin D.I., Cherepetskaya E.B. Assessment of the degree of damage to rock salt samples during their cyclic deformation (based on thermoradiation measurements). *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 47-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-47-52>.

Введение

В настоящее время одним из эффективных способов хранения газообразных и жидких углеводородов является устройство хранилищ в массивах каменной соли [1]. В процессе циклической эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ) происходят существенные изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающего массива каменной соли, которые могут привести к повышению его нарушенности, что, в свою очередь, увеличивает вероятность миграции хранимого продукта [2]. Этим определяется актуальность лабораторных и натурных экспериментов, направленных на разработку способов, позволяющих оценивать изменения механического состояния и степень нарушенности геоматериалов (в том числе и каменной соли), подвергаемых циклическому деформированию.

Известно [3, 4], что в процессе циклического нагружения геоматериалов происходят значительные изменения их механического состояния, фиксируемые в том числе и по изменениям характера зависимостей напряжение – деформация, соответствующих различным циклам. Следует отметить, что для разных геоматериалов указанные трансформации имеют отличительные особенности [3–6]. Подобные изменения механических свойств материалов отражаются в сопутствующих процессам деформирования изменениях измеряемых параметров физических полей [7, 8], на основе которых разработан целый ряд методов геоконтроля [9].

Одним из таких активно развивающихся методов является оценка геомеханического состояния породных массивов по данным об изменениях регистрируемых параметров электромагнитных сигналов инфракрасного диапазона (ИК-радиометрия) [10–12]. Преимущество ИК-измерений перед другими экспериментальными способами исследования изменений напряженного состояния – бесконтактность, что делает их применимыми в условиях, когда измерить изменения напряжений с помощью других способов трудно или практически невозможно, например в призабойных зонах глубоких скважин.

Однако в указанных работах предполагается использование терморadiометрических измерений применительно к модели геоматериала как однородного упругого тела. Между тем такие бесконтактные измерения могут оказаться надежным инструментом выявления и количественной оценки параметров нарушенности геоматериалов [13–15], что, несомненно, открывает новые возможности эффективного использования ИК-радиометрии.

Цель исследований: установление влияния физико-механических свойств геоматериалов и условий их деформирования на параметры сигналов сопутствующего теплового (ИК-) излучения.

Материал и методы исследования

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

Так же, как и в [10, 16], в качестве первичного приемника ИК-излучения используется детектор РТН-31 [17], предназначенный для бесконтактного измерения изменений интенсивности оптического излучения в инфракрасном диапазоне частот. Датчик ИК-излучения (1) устанавливается примерно в середине высоты образца (2) на расстоянии 0,5–1 см от его поверхности.

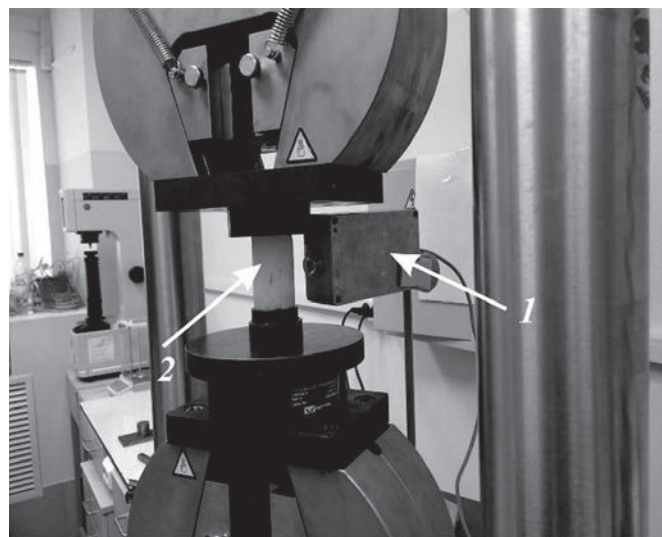


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 – ИК-радиометр; 2 – образец каменной соли /
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stand:
1 – IR radiometer; 2 – rock salt sample

Измерения выполнялись на испытательной машине Instron 150LX с помощью автоматизированного комплекса, позволяющего вести синхронную регистрацию механических и термоэмиссионных параметров [10, 16]. В экспериментах скорость изменения осевой деформации $d\epsilon_1 / dt$ на участках нагружения и разгрузки поддерживалась постоянной по абсолютной величине. Выбор значений $d\epsilon_1 / dt$, обеспечивающих «квазиadiaбатичность» деформирования, основан на результатах проведенных ранее экспериментов [16].

В описываемом «типовом» эксперименте на каждом цикле нагружение – разгрузка нагрузка возрастала до значения $\sigma_{max} \approx 18$ МПа, после чего осуществлялась его разгрузка до значения, при котором $\sigma_1 \approx 0,1$ МПа.

Предел прочности на одноосное сжатие σ_c подвергаемых многоцикловым испытаниям образцов каменной соли с учетом данных прочностных одноцикловых испытаний образцов из той же серии принят составляющим около 20 МПа. Выбор отношения $\sigma_{max} / \sigma_c = 0,9$ соответствует относительному максимальному уровню напряжений, принимаемому в лабораторных исследованиях по моделированию влияния циклических многократных нагружений на устойчивость подземных газохранилищ [18]. Отметим, что σ_{max} значительно превосходит предел упругости $\sigma_e \approx 10$ –12 МПа, характерный для исследуемых образцов каменной соли [16] при однократном испытании.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведены кривые изменения во времени осевого напряжения $\sigma_1(t)$ (1), осевой деформации $\epsilon_1(t)$ (2) и интенсивности ИК-излучения $V(t)$ (3) при деформировании образца в условиях последовательных циклов нагружение – разгрузка ($|d\epsilon_1| = const = 3$ мм/мин) при постоянном значении амплитуды нагрузки. Разрушение образца при указанной амплитуде изменения напряжений произошло на восьмом цикле.

Более наглядно особенности рассматриваемого процесса циклического деформирования могут быть представлены в координатах осевое напряжение – осевая деформация. Диаграмма $\sigma_1(\epsilon_1)$ для рассматриваемого образца показана на

рисунке 3, где отчетливо прослеживается изменение наклона соответствующих упругой стадии деформирования «линейных» участков графиков, что указывает на уменьшение жесткости геоматериала (модуля деформации E) с увеличением номера цикла нагружения. Такая особенность диаграмм $\sigma_1(\epsilon_1)$ наблюдается для многих типов грунтов и горных пород, подвергаемых циклическому деформированию [13, 14].

Похожим образом ведет себя и соответствующая рассмотренной диаграмме $\sigma_1(\epsilon_1)$ зависимость $V(\epsilon_1)$, представленная на рисунке 4, по которой также визуальным образом прослеживается заметное изменение на каждом цикле угла наклонов аналогичных участков графика.

Для детализации и уточнения факта такой трансформации кривых на рисунке 5 для циклов с $n = 3-8$ приведены обозначенные 1 зависимости $\sigma_1(\epsilon_1)$, характеризующие процесс деформирования в режиме нагружения, и соответствующие кривые $V(\epsilon_1)$, обозначенные 2.

В настоящее время одним из общепризнанных способов оценки поврежденности материалов является метод, основанный на зависимости жесткости материала от его нарушенности [19].

В простейшем случае дефектность материала характеризуется параметром (поврежденностью) D , определяемым по формуле:

$$D = 1 - (E/E_0), \quad (1)$$

где E_0 – модуль упругости ненарушенного геоматериала,

E – модуль деформации материала со структурными нарушениями.

Поэтому, определив тангенс угла наклона соответствующих участков зависимостей $\sigma_1(\epsilon_1)$ или $V(\epsilon_1)$, мы можем получить зависимость жесткости испытываемого образца от номера цикла нагружения и тем самым проследить динамику поврежденности материала.

На рисунке 6а приведена зависимость определяемого по графику $\sigma_1(\epsilon_1)$ изменения модуля $E = \Delta\sigma_1 / \Delta\epsilon_1$ от номера цикла нагружения n , а на рисунке 6б – зависимость изменения коэффициента $k = \Delta V / \Delta\epsilon_1$, определяемого аналогичным образом по графику $V(\epsilon_1)$.

Как видно из рисунка 6а, значение модуля E образца каменной соли возрастает после первого цикла деформирования, что связано с упрочнением материала. Далее зависимость $E(n)$ полого спадает с ростом номера n цикла нагружения – разгрузка. Такое изменение деформационных свойств испытываемого образца вполне согласуется с данными многочисленных исследований усталостного поведения геоматериалов [3, 20, 21]. Аналогично ведет себя и коэффициент k , зависимость которого от номера цикла n представлена на рисунке 6б.

Выводы

1. В статье описаны результаты экспериментов по исследованию ИК-излучения с поверхности образцов каменной соли, подвергаемых циклическому нагружению в условиях одноосного сжатия. Особенностью описываемых исследований является синхронная регистрация изменений интенсивности ИК-излучения и деформационно-прочностных характеристик испытываемых образцов горных пород. Качественно продемонстрирована корреляция фиксируемых

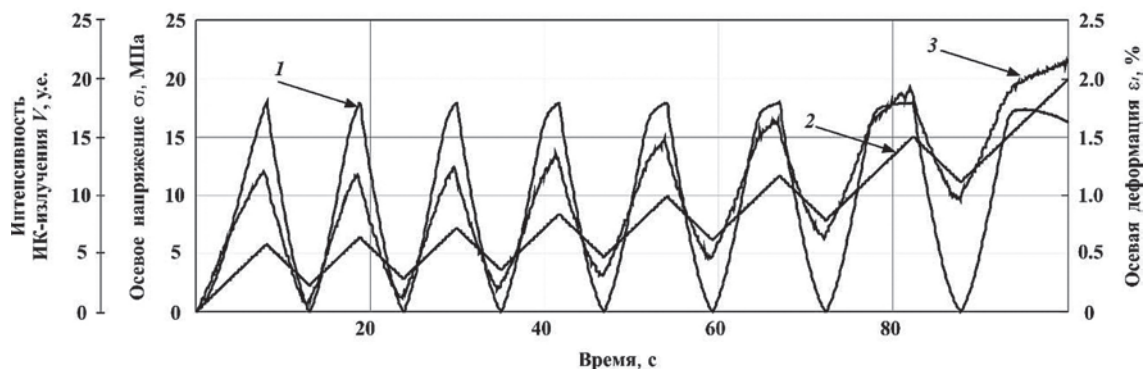


Рис. 2. Зависимости осевого напряжения $\sigma_1(t)$ (1), осевой деформации $\epsilon_1(t)$ (2) и интенсивности ИК-излучения $V(t)$ (3) от времени при $d\epsilon_1/dt = \text{const} = 3 \text{ мм/мин}$ /

Fig. 2. Dependences of axial stress $\sigma_1(t)$ (1), axial deformation $\epsilon_1(t)$ (2) and IR radiation intensity $V(t)$ (3) on time at $d\epsilon_1/dt = \text{const} = 3 \text{ мм/мин}$

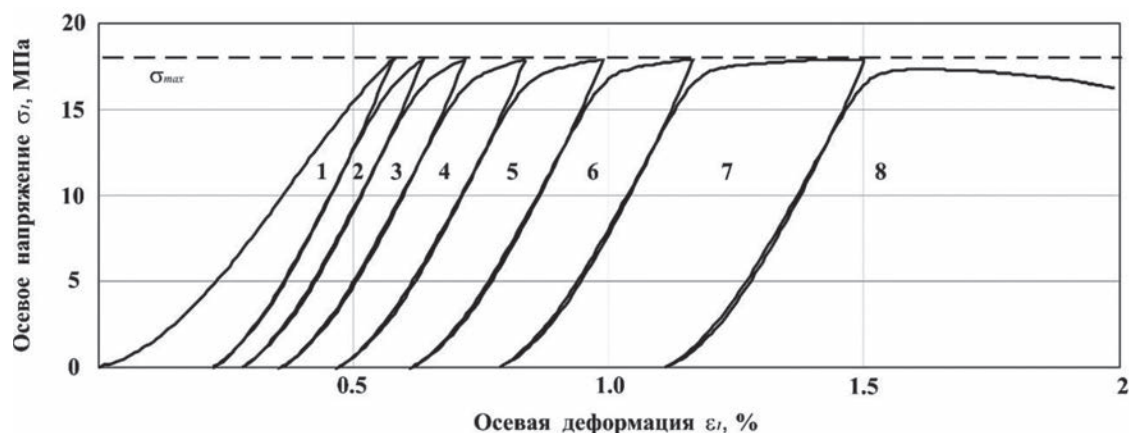


Рис. 3. Диаграмма $\sigma_1(\epsilon_1)$: 1-8 – номера циклов /

Fig. 3. Diagram $\sigma_1(\epsilon_1)$: 1-8 – cycle numbers

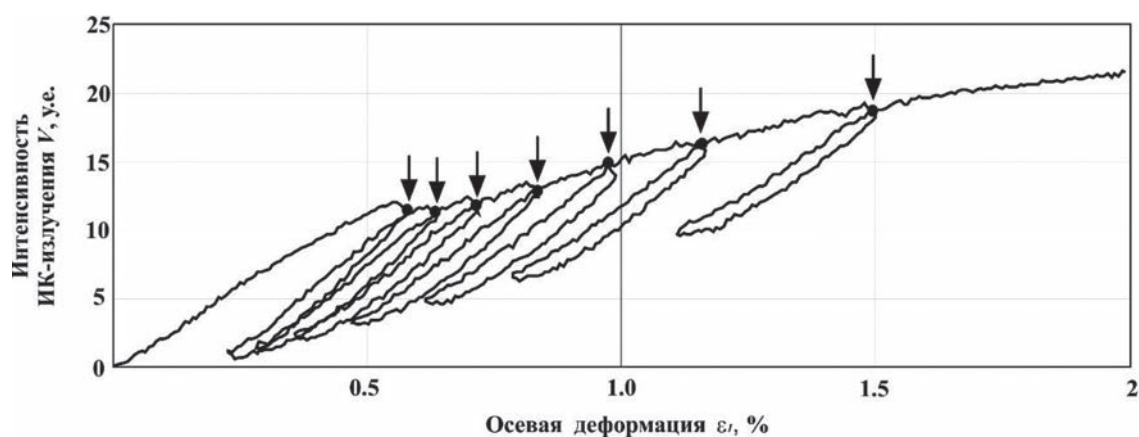


Рис. 4. Зависимость $V(\varepsilon_1)$ / Fig. 4. Dependence $V(\varepsilon_1)$

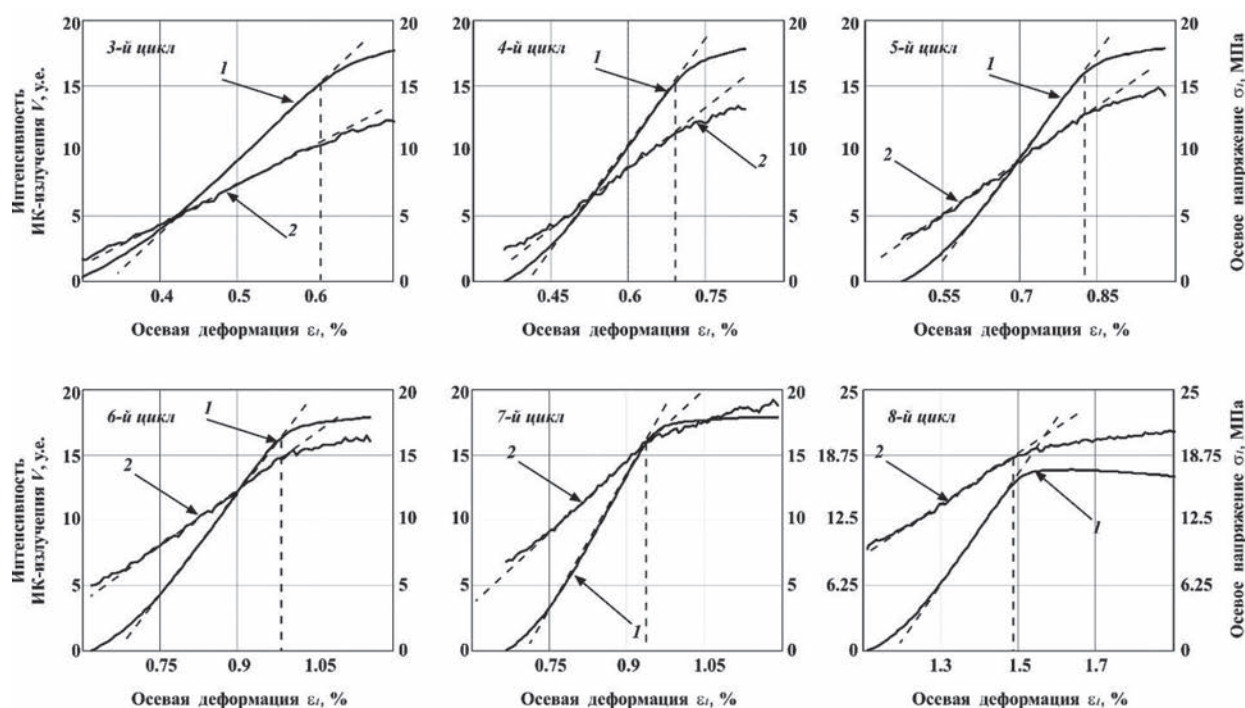


Рис. 5. Зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)(1)$ и $V(\varepsilon_1)(2)$ для участков нагружения, соответствующих циклам с $n = 3-8$ / Fig. 5. Dependencies $\sigma_1(\varepsilon_1)(1)$ and $V(\varepsilon_1)(2)$ for loading sections corresponding to cycles with $n = 3-8$

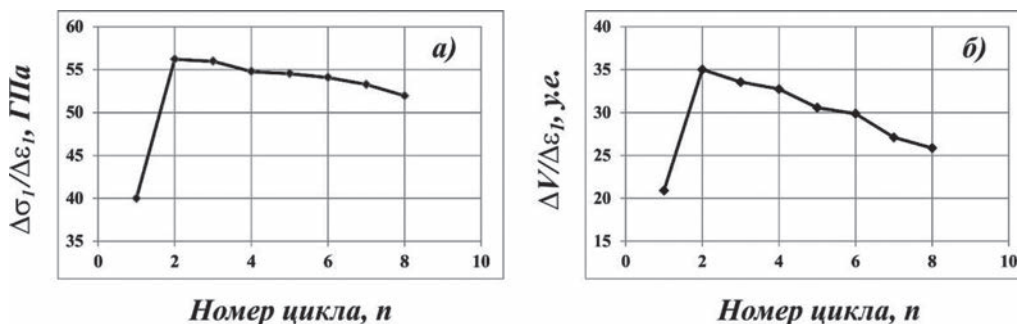


Рис. 6. Зависимости $E(n)$ (a) и $k(n)$ (б) / Fig. 6. Dependencies $E(n)$ (a) and $k(n)$ (b)

изменений механических величин и параметров, характеризующих вариации ИК-излучения при описываемых режимах циклических испытаний.

2. Показано, что значения введенного коэффициента k , определяемого по зависимостям изменений интенсивности инфракрасного излучения от продольной деформации и являющегося аналогией модуля деформации E , умень-

шаются с ростом номера n цикла нагружения – разгрузки.

3. Выявленная идентичность между зависимостями $E(n)$ и $k(n)$ указывает на принципиальную возможность реализации использования данных бесконтактных терморadioионных измерений для оценки степени поврежденности образцов каменной соли, а в перспективе и породных массивов, включающих подземные выработки, в том числе и ПХГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сильвестров Л.К. Базовые принципы подземного хранения жидкостей и газов. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2006; (5): 36-39. Silvestrov L.K. Basic Principles of Underground Storage of Liquids and Gases. *Energy: Economics, Technology, and Ecology*. 2006; (5): 36-39. (In Russ.).
2. Богданов Ю.М., Журавлева Т.Ю., Сильверстов Л.К. и др. Результаты исследования геомеханических процессов при закачке и отборе газа на ПХГ в каменной соли. *Газовая промышленность*. 2010; (6): 72-75. Bogdanov Yu.M., Zhuravleva T.Yu., Silverstov L.K., et al. Results of the study of geomechanical processes during gas injection and extraction at UGS in rock salt. *Gas Industry*. 2010; (6): 72-75. (In Russ.).
3. Мохначев М.П. Усталость горных пород. Москва, 1979: 152. Mokhnachev M.P. Rock Fatigue. Moscow, 1979: 152. (In Russ.).
4. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. Москва, 1999: 264. Voznesensky E.A. Dynamic Instability of Soil. Moscow, 1999: 264. (In Russ.).
5. Fuenkajorn K., Phueakphum D. Effects of Cyclic Loading on Mechanical Properties of Maha Sarakham Salt. *Engineering Geology*. 2010, 112 (1): 43-52.
6. Высотин Н.Г. Нелинейные особенности упругого гистерезиса образцов горных пород при циклическом одноосном нагружении. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; (4-1): 148-157. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_41_0_148. Vysotin N.G. The specific non-linear elastic hysteresis of rocks under cyclic uniaxial tension. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; (4-1): 148-157. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_41_0_148.
7. Простов С.М., Разумов Е.Е., Мулев С.Н. и др. Обоснование критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации естественного электромагнитного излучения на шахтах Кузбасса. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022; 333 (12): 99-110. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3831>. Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., et al. Justification of criteria for local prediction of impact safety by registering natural electromagnetic radiation at the mines of AO «SUEK-Kuzbass». *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022; 333 (12): 99-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3831>.
8. Баженова Е.А. Применение геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в комплексе со стандартными методами геофизических исследований для выявления зон геодинамической активности в рудных скважинах. *Литосфера*. 2025; 25 (3): 644-655. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-644-655>. Bazhenova E.A. Application of geoaoustic emission and electromagnetic radiation in combination with standard geophysical research methods to identify geodynamic activity areas in ore boreholes. *Lithosphere*. 2025; 25 (3): 644-655. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-644-655>.
9. Курленя М.В., Опарин В.Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. Новосибирск, 1999: 328. Kurlenya M.V., Oparin V.N. Borehole geophysical methods for diagnostics and control of the stress-strain state of rock formations. Novosibirsk, 1999: 328. (In Russ.).
10. Блохин Д.И., Иванов П.Н., Дудченко О.Л. Экспериментальное исследование термомеханических эффектов в водонасыщенных известняках при их деформировании. *Записки Горного института*. 2021; 247: 3-11. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.1>. Blokhin D.I., Ivanov P.N., Dudchenko O.L. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation. *Journal of Mining Institute*. 2021; 247: 3-11. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.1>.
11. Cao K., Ma L., Wu Y., et al. Cyclic fatigue characteristics of rock failure using infrared radiation as precursor to violent failure: Experimental insights from loading and unloading response. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2021; 44: 584-594. <https://doi.org/10.1111/ffe.13362>.
12. Huang J., Yu M., Zhang C. Quantitative spatial analysis of thermal infrared radiation temperature fields by the standard deviational ellipse method for the uniaxial loading of sandstone. *Infrared Physics & Technology*. 2022; 123: 104150. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104150>.
13. Balueva M.A., Blokhin D.I., Savatorova V.L., et al. Simulation of microcrack influence on temperature variations within geomaterials under deformation. *Journal of Mining Science*. 2009; (4) 6: 576-580. <https://doi.org/10.1007/s10913-009-0072-z>.
14. Sun H., Zhu H.-Y., Han J., et al. Energy and Infrared Radiation Characteristics of the Sandstone Damage Evolution Process. *Materials*. 2023; 16 (12): 4342. <https://doi.org/10.3390/ma16124342>.
15. Liu W., Ma L., Gao Q., et al. Fracture Precursor Recognition and Damage Quantitative Characterization of Stressed Rock Using Infrared Radiation. *Rock Mech. Rock Eng*. 2023; 56: 5567-5584. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03344-w>.
16. Sheinin V.I., Blokhin D.I. Features of thermomechanical effects in rock salt samples under uniaxial compression. *Journal of Mining Science*. 2012; 48 (1): 39-45. <https://doi.org/10.1134/S1062739148010054>.
17. Ильин А.С. Термоэлектрические приемники оптического излучения с пленочными и проволочными термопарами для прецизионных измерений. *Метрология*. 2005; (11): 19-30. Ilyin A.S. Thermoelectric Receivers of Optical Radiation with Film and Wire Thermocouples for Precision Measurements. *Metrology*. 2005; (11): 19-30. (In Russ.).
18. Guo Y.T., Zhao K.L., Sun G.H., et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading. *Rock and Soil Mechanics*. 2011; 32(5): 1353-1359.
19. Liu J., Xie H., Hou Z., et al. Damage evolution of rock salt under cyclic loading in uniaxial tests. *Acta Geotechnica*. 2014; 9 (1): 153-160. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0236-5>.
20. Zhou T., Qin Y., Cheng J., et al. Study on Damage Evolution Model of Sandstone under Triaxial Loading and Postpeak Unloading Considering Nonlinear Behaviors. *Geofluids*. 2021; 2395789. <https://doi.org/10.1155/2021/2395789>.
21. Zhao Y., Li Q., Zhang K. et al. Effect of fissure angle on energy evolution and failure characteristics of fractured rock under uniaxial cyclic loading. *Scientific Reports*. 2023; (13): 2678. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26091-4>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Иванович Блохин –

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4652-661X>; e-mail: dblokhin@yandex.ru

Елена Борисовна Черепецкая –

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9642-2149>

Критерии авторства:

Авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.02.2026

Поступила после рецензирования: 27.03.2026

Принята к публикации: 09.04.2026

ABOUT THE AUTHORS

Dmitry I. Blokhin –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4652-661X>; e-mail: dblokhin@yandex.ru

Elena B. Cherepetskaya –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Physical Processes in Mining and Geological Control, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9642-2149>

Contribution:

The authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 16.02.2026

Revised: 27.03.2026

Accepted: 09.04.2026