

УДК622.831

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ЭМИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**А.Г. Вострецов^{1,2}, А.А. Бизяев^{1,2}, Г.Е. Яковицкая²**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН*

Описаны эффекты изменения структуры и спектральных характеристик сигналов электромагнитного излучения на стадии, предшествующей нарушению сплошности образцов горных пород, и разработаны диагностические критерии их разрушения.

Ключевые слова: разрушение, электромагнитное излучение, нагрузка, деформация, прогноз, нелинейность, квазирезонансный процесс, спектральные характеристики, горные породы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-3-38-46

Введение

Исследования процесса разрушения образцов горных пород в лабораторных экспериментах с регистрацией уровня нагружения на образец и сопутствующего электромагнитного излучения (ЭМИ) проводились многими научными коллективами. Благодаря работам М.А. Садовского и его учеников [1] внимание к проблеме структурной иерархии заметно возросло. Авторы считают, что процесс формирования потенциального очага разрушения с учетом иерархической блоковой структуры постепенно охватывает все больший объем, приближаясь к размеру взаимодействующих блоков.

Актуальность проблемы прогноза и контроля динамических проявлений в массивах горных пород предопределяет появление различного рода концепций развития модельных представлений о процессе накопления повреждений в массивах и о динамических проявлениях в нем.

К настоящему времени многими исследователями используются два подхода, реализованные в двух- и трехстадийной моделях разрушения. Первая из них – кинетическая концепция прочности твердых тел (дополняющий ее концентрационный критерий разрушения) успешно развивается в ФТИ им. А.Ф. Иоффе [2, 3], вторая – в ОИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта [4]. Основной вывод, содержащийся в [5–7], заключается в том, что разрушение твердого тела при его механическом нагружении происходит не только при достижении предела прочности, но и при меньших нагрузках, однако для этого необходимы более длительные воздействия на образец.

Показано, что и в образце, и на участке массива, т. е. на различных структурных уровнях исследуемых объектов, существенную роль играет концентрационный критерий разрушения. Первая стадия, считают авторы [13], является стадией некоррелированного накопления трещин, а вторая – стадией образования очага разрушения.

Теоретические обоснования возникновения явления электромагнитного излучения при трещинообразовании были рассмотрены в работах [8–9]. Одним из

первых авторов, объясняющих возникновения сигналов ЭМИ при раскрытии одиночной трещины, был В. В. Панасюк [11], которым установлено, что при возникновении трещины время ее развития равно длительности сигнала ЭМИ.

Впервые в нашей стране электромагнитное излучение, возникающее при нагружении образцов горных пород, было зарегистрировано в Томском политехническом институте в 70-х годах прошлого столетия [8].

При этом установлено, что с увеличением размеров образующихся трещин частоты излучаемых ими сигналов ЭМИ снижаются [13]. Показано, что и количество, и амплитуды сигналов ЭМИ по мере роста нагрузки имеют тенденцию к увеличению. Ю. А. Головиным [12] при исследованиях на щелочно-галоидных кристаллах (ЩГК), по-видимому, впервые отмечено, что при нагружении образца KCl низкочастотные импульсы ЭМИ появляются на стадии микропластической деформации и сопровождают весь процесс деформирования, а высокочастотные – интенсивно генерируются лишь на последней стадии нагружения. Этими же авторами [12] установлено, что доля высокочастотных импульсов ЭМИ варьировалась от 0 для чистых кристаллов KCl и NaCl до нескольких процентов в LiF.

1. Задачи проведения экспериментальных исследований

Ранее в [12] были описаны эксперименты по синхронной двухканальной регистрации нагрузки и сигналов ЭМИ при нагружении образцов горных пород. В настоящей работе предпринята попытка дополнительно разработать методику и провести эксперименты по трехканальной регистрации нагрузки, деформации (деформаций) и сигналов ЭМИ. Для этого было необходимо дополнительно разработать канал для регистрации деформации и обеспечить синхронную регистрацию сигналов ЭМИ, нагрузки и деформации при нагружении образцов горных пород на различных стадиях разрушения в диапазоне частот до 125 кГц.

Для решения поставленных задач лабораторный стенд был дополнен каналом регистрации деформации (деформаций) в образце, обеспечена синхронная регистрация сигналов ЭМИ, нагрузки и деформации в диапазоне частот до 125 кГц и сформулированы следующие задачи экспериментальных исследований:

- выявление наиболее информативных участков осциллограмм сигналов ЭМИ на различных стадиях нагружения;
- определение количества импульсов ЭМИ при разрушении образцов горных пород, длительности этих импульсов t , временные интервалы между соседними импульсами T и их изменение по мере увеличения нагрузки на образец;
- исследование характера изменений в структуре сигналов ЭМИ на различных стадиях нагружения образцов горных пород и на их основе выявление закономерности подготовки и протекания процесса разрушения в электромагнитных образцах;
- разработка на основании установленных закономерностей прогнозных признаков разрушения образцов горных пород.

2. Структура канала измерений деформации в образце горных пород

Для измерения деформации в образцах горных пород в лабораторном эксперименте использовался датчик перемещений MS 30-1-LD фирмы «MEGATRON» (Германия), в основе которого заложена модуляция светового потока при прохождении его через измерительную линейку с нанесенными на ее поверхность рисками. Датчик подключался к устройству регистрации деформации, которое преобразует сигналы инкрементального датчика в непрерывную аналоговую

величину, синхронно меняющуюся при передвижении штока датчика в заданном направлении (рис. 1). Это обеспечивает возможность синхронной регистрации сигналов ЭМИ, нагрузки и деформации в лабораторном эксперименте.



Рис. 1 – Структура канала регистрации деформации с подключенным датчиком перемещений

Fig. 1 – Structure of the channel of deformation recording with the connected displacement sensor

3. Стенд для проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования выполнялись на лабораторном стенде (рис. 2), включающем пресс усилием до 300 кН. Для регистрации сигналов ЭМИ использовались стандартные датчики ЭМИ электрического и магнитного типов фирмы RFT (Германия), выполненные в виде штыревых и стержневых антенн, последовательно подключаемые к инструментальному усилителю с полосой пропускания 3 Гц – 300 кГц и коэффициентом усиления 500.

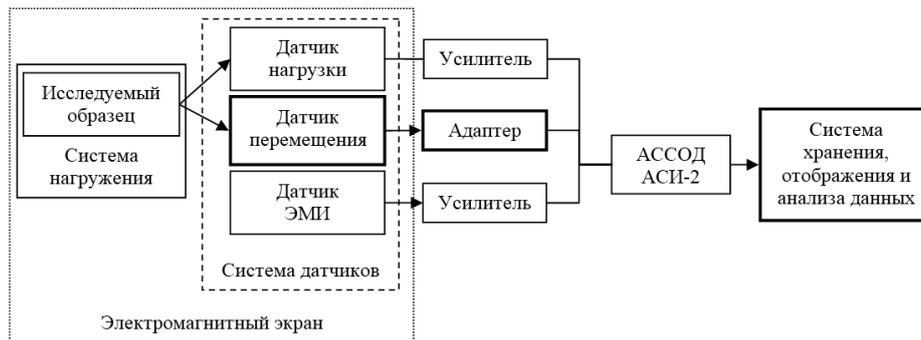


Рис. 2 – Структурная схема стенда для проведения экспериментальных исследований с синхронной регистрацией нагрузки, продольных деформаций и сигналов ЭМИ на образцах горных пород

Fig. 2 – A structural diagram of the stand for the experimental studies with simultaneous recording of a load, longitudinal deformations and EMR signals on rock samples

На данном стенде исследовалась структура сигналов ЭМИ при одноосном нагружении со скоростью 0,316 кН/с образцов мраморной мелкозернистой плитки размерами 80 × 80 × 20 мм и цилиндрических кернов диабазы высотой 60 мм и диаметром 20 мм.

Обеспечение синхронной регистрации сигналов ЭМИ, деформации и нагрузки в образце по мере ее роста осуществлялось автоматизированной системой сбора и обработки данных (АССОД) АСИ-2, разработанной в ИГД СО РАН. В процессе экспериментов величина нагрузки, деформации и сигналы ЭМИ синхронно регистрировались по трем каналам, фиксировались в памяти компьютера и отображались на экране монитора. Шаг дискретизации сигналов составлял 4 мкс.

4. Результаты экспериментальных исследований

Результаты одного из экспериментов приведены на рис. 3 – синхронные осциллограммы сигналов ЭМИ, полученные с помощью датчика электрического типа (а), деформации (б) и нагрузки (в) для нагружаемого образца диабаз вплоть до его разрушения. По осям абсцисс отложено время, а по осям ординат – отсчеты соответственно сигналов ЭМИ, деформации и нагрузки.

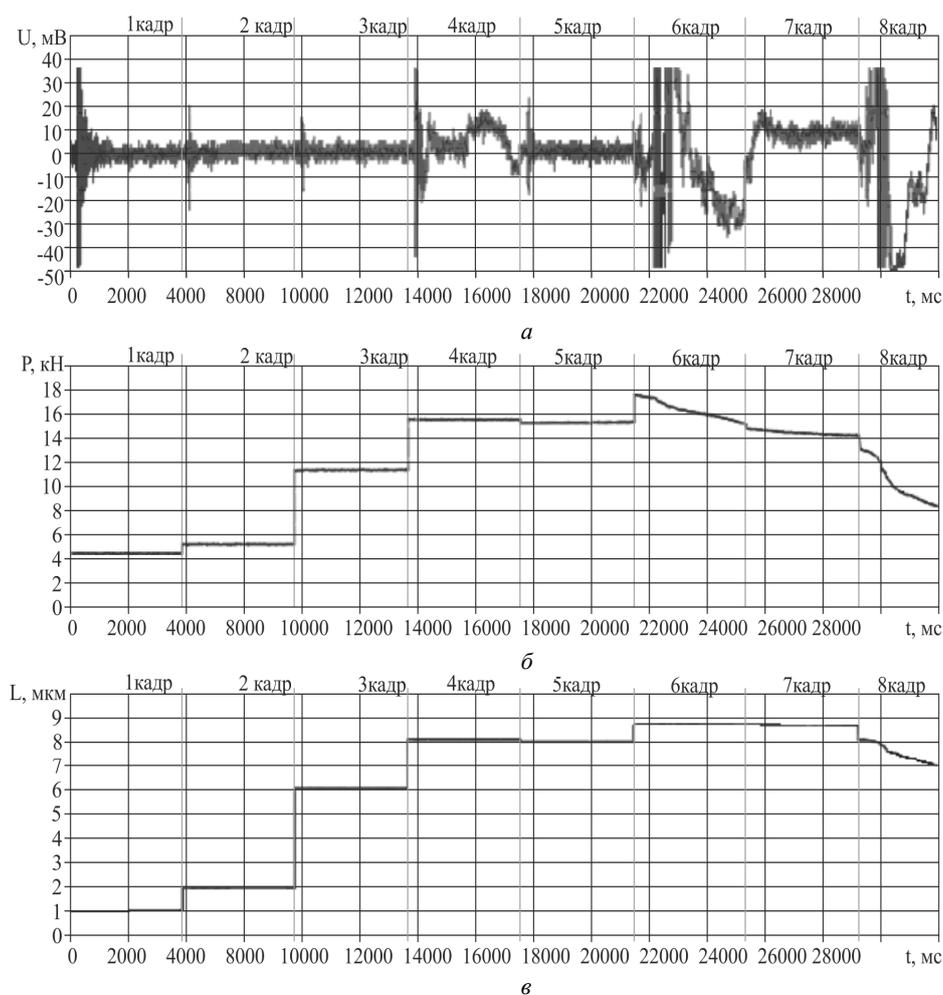


Рис. 3 – Осциллограммы сигналов ЭМИ (а), нагрузки (б) и деформации (в) в эксперименте по одноосному нагружению образца диабаз

Fig. 3 – Oscillograms of EMR signals (a), load (b) and strain (c) in the experiment on uniaxial loading of a diabase specimen

Из рис. 3 видно, что задолго до потери несущей способности исследуемого образца, характеризуемой падением нагрузки и деформации, в структуре сигнала ЭМИ появляются изменения в виде возникновения и последующего увеличения доли низкочастотных составляющих, что согласно [5] характеризует начало его разрушения. Кроме того, в сигнале присутствуют короткие импульсы, которые обусловлены возникновением отдельных трещин в образце, не приводящих к потере его несущей способности. Таким образом, синхронная регистрация

нагрузки, деформации и сигналов ЭМИ подтверждает, что появление низкочастотных компонент в структуре сигналов ЭМИ свидетельствует о начале разрушения образца при его нагружении.

На рис. 4 представлены аналогичные осциллограммы для образца мрамора. Видно, что процесс, предшествующий моменту нарушения сплошности образца, также сопровождается аналогичным изменением структуры и параметров сигнала ЭМИ.

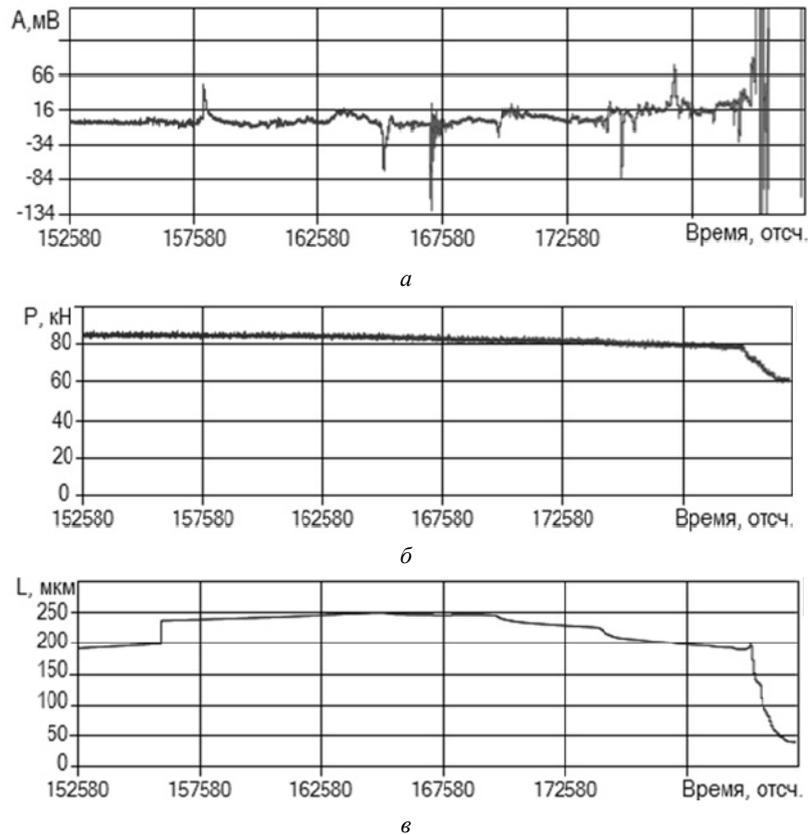


Рис. 4 – Осциллограмма сигналов ЭМИ (а), нагрузки (б) и деформаций (в) в эксперименте по одноосному нагружению образца мрамора

Fig. 4 – An oscillogram of EMR signals (a), loads (b) and deformations (c) in an experiment on uniaxial loading of a marble sample

Отметим также, что данные экспериментов показывают, что регистрация деформационных параметров позволяет на более ранней стадии, чем при регистрации механических напряжений, зафиксировать момент нарушения сплошности образца. Кроме того, процесс деформации на образцах и в массиве регистрировать удобнее, чем механические напряжения.

Таким образом, наиболее ранняя стадия разрушения образцов регистрируется в канале ЭМИ и характеризуется возникновением сигналов различной структуры, затем следует регистрация изменения характера деформаций, и только потом это фиксируется в канале регистрации нагрузки.

Данные особенности регистрируемых величин положены в основу предлагаемого способа диагностики разрушения участка массива горных пород.

5. Диагностические критерии разрушения на основе анализа структуры и спектральных характеристик сигналов ЭМИ

Как известно, при нагружении горных пород и регистрации сигналов ЭМИ, длительности импульсов ЭМИ τ_i пропорциональны размерам возникающих трещин. При увеличении нагрузки на участок массива длительности сигналов ЭМИ также увеличиваются, например, до τ_{pi} , что свидетельствует об увеличении размеров образующихся трещин.

При слиянии трещин в более крупные длительности изучаемых импульсов ЭМИ еще более увеличивается.

Измерение длительностей T_i интервалов следования импульсов ЭМИ с длительностью τ_i и выделение интервалов T_{pi} следования импульсов с длительностью τ_{pi} позволяет более точно установить время возникновения большого количества трещин и предсказать скорое разрушение исследуемого участка массива горных пород. С уменьшением длительностей T_{pi} интервалов следования импульсов ЭМИ, начиная с некоторого T_{pn} , по мере увеличения нагрузки на исследуемый участок массива свидетельствует о том, что возникает и прорастает большое количество трещин. Это позволяет судить о начале нарушения сплошности исследуемого участка массива.

Дальнейшее увеличение длительностей τ_{pi} импульсов ЭМИ до $\tau_{p(n-1)}$ и уменьшение длительностей T_{pi} интервалов следования импульсов ЭМИ до $T_{p(n-1)}$ позволяет проследить развитие процесса разрушения, т. е. процесса возникновения еще большего количества трещин и слияния их в более крупные, их ветвления и т. д., что делает возможным детализировать степень развития процесса нарушения сплошности участка массива на стадии, пока он еще способен выдерживать увеличивающуюся нагрузку. Последующее увеличение обоих параметров конкретизирует переход от начала нарушения сплошности к интенсивному развитию процесса нарушения сплошности. Этот переход свидетельствует о том, что массив уже более не способен выдерживать увеличивающуюся на него нагрузку, при этом оба параметра достигают критических значений τ_{pn} и T_{pn} .

Соотношения

$$\tau_{pn} \geq (2,6 - 4,5)\tau_{рн},$$

$$T_{pn} \leq (3,8 - 6,4)T_{рн}$$

определяют критическое состояние образца, после которого наступает разделение его на фрагменты. Здесь τ_{pn} – максимальное значение длительности импульса ЭМИ на исследуемом интервале времени (n -й интервал следования импульсов ЭМИ); $\tau_{рн}$ – минимальное значение длительности импульса ЭМИ на исследуемом интервале времени, начиная с которого происходит ее увеличение; T_{pn} – минимальное значение длительности интервала между импульсами ЭМИ (n -й интервал следования импульсов ЭМИ); $T_{рн}$ – максимальное значение длительности интервала между импульсами ЭМИ, начиная с которого происходит ее уменьшение.

Указанная совокупность признаков дает информацию о приближении разрушения образца, что позволяет определить более достоверно момент его разрушения на фрагменты.

Заключение

Создан лабораторный стенд и проведены эксперименты по синхронной регистрации сигналов ЭМИ, нагрузки и деформации при одноосном нагружении образцов горных пород вплоть до их разрушения. Выявлены особенности изменений в структуре сигналов ЭМИ, возникающие при приближении момента нарушения сплошности образца. Предложены диагностические критерии определения критического состояния образца на основе анализа структуры сигналов ЭМИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
2. Куксенко В.С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности. – Л.: Наука, 1986. – С. 36–41.
3. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // Доклады АН СССР. – 1981. – Т. 259, № 6. – С. 1350–1353.
4. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов / А.Ю. Гор, В.С. Куксенко, Н. Г. Томилин, Д.И. Фролов // ФТПРПИ. – 1989. – № 3. – С. 54–60.
5. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. – М.: Наука, 1993. – 314 с.
6. О прогнозировании разрушения горных пород / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров, В.Н. Савельев, У.О. Султанов // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. – 1977. – № 6. – С. 11–18.
7. Основы физики очага и предвестники землетрясения / В.И. Мячкин, Б.В. Костров, Г.А. Соболев, О.Г. Шамина // Физика очага землетрясений. – М.: Наука, 1975. – С. 104–117.
8. Воробьев А.А., Заводовская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводности и радиоизлучения горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // Доклады АН СССР. – 1975. – Т. 220, № 1. – С. 82–85.
9. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1977. – 503 с.
10. Панасюк В.В., Колодий Б.И. Теоретическое исследование электромагнитного излучения при развитии круговой трещины в диэлектрике // Физико-химическая механика материалов. – 1983. – № 5. – С. 72–75.
11. Головин Ю.И., Шибков А.А. Быстропротекающие электрические процессы в пластически деформируемых щелочно-галлоидных кристаллах // ФТТ. – 1987. – Т. 28, вып. 11. – С. 3492–3499.
12. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 314 с.
13. Патент 2426880 Российская Федерация, МПК7 Е 21 С 39/00. Способ прогноза разрушения горных пород / А.Г. Вострецов, А.А. Бизяев, А.В. Кривецкий, Г.Е. Яковицкая. – № 2002123946/03; заявл. 09.09.2002; опубл. 27.05.11, Бюл. № 23. – 4 с.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON SYNCHRONOUS RECORDING OF MECHANICAL AND ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF EMP SIGNALS UNDER LOADING OF MINERAL ROCKS

Vostretsov A.G.^{1,2}, Bizyaev A.A.^{1,2}, Yakovitskaya G.E.²

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

² Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The effects of changing the structure and spectral characteristics of signals of electromagnetic radiation at a stage preceding the disruption of the continuity of rock samples are described and diagnostic criteria for their destruction are developed.

Keywords: destruction, electromagnetic radiation, load, deformation, prognosis, nonlinearity, quasiresonance process, spectral characteristics, rocks.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-3-38-46

REFERENCES

1. Sadovskii M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. *Deformirovanie geofizicheskoi sredy i seismicheskii protsess* [Deformation of the geophysical environment and seismic process]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 100 p.
2. Kuksenko V.S. Model' perekhoda ot mikro- k makrorazrusheniyu tverdykh tel [Model of transition from micro to macrofracture of solids]. *Fizika prochnosti i plastichnosti* [Physics of strength and plasticity]. Leningrad, Nauka Publ., 1986, pp. 36–41.
3. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Fizicheskie osnovy prognozirovaniya mekhanicheskogo razrusheniya [Physical bases of mechanical damage prediction]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Proceedings of the Russian Academy of Sciences*, 1981, vol. 259, no. 6, pp. 1350–1353. (In Russian).
4. Gor A.Yu., Kuksenko V.S., Tomilin N.G., Frolov D.I. Kонтсentratsionnyi porog razrusheniya i prognoz gornyykh udarov [Concentration destruction threshold and prediction of mining impacts]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 1989, no. 3, pp. 54–60. (In Russian).
5. Sobolev G.A. *Osnovy prognoza zemletryasenii* [Basics of earthquake prediction]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 314 p.
6. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A., Savel'ev V.N., Sultanov U.O. O prognozirovanii razrusheniya gornyykh porod [On predicting the destruction of rocks]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli – Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1977, no. 6, pp. 11–18. (In Russian).
7. Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Osnovy fiziki ochaga i predvestniki zemletryaseniya [Fundamentals of physics of the focus and the precursors of an earthquake]. *Fizika ochaga zemletryaseniya* [Physics of the earthquake focus]. Moscow, Nauka Publ., 1975, pp. 104–117.
8. Vorob'ev A.A., Zavodovskaya E.K., Sal'nikov V.N. Izmenenie elektroprovodnosti i radioizlucheniya gornyykh porod i mineralov pri fiziko-khimicheskikh protsessakh v nikh [The change in electric conductivity and the radio emission of rocks and minerals during physico-chemical processes taking place in them]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Proceedings of the Russian Academy of Sciences*, 1975, vol. 220, no. 1, pp. 82–85. (In Russian).
9. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kaspar'yan E.V. *Osnovy mekhaniki gornyykh porod* [Basics of rock mechanics]. Leningrad, Nedra Publ., 1977. 503 p.
10. Panasyuk V.V., Kolodii B.I. Teoreticheskoe issledovanie elektromagnitnogo izlucheniya pri razvitiy krugovoi treshchiny v dielektrike [Theoretical study of electromagnetic radiation during the development of a circular crack in a dielectric]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov – Physico-Chemical Mechanics of Materials*, 1983, no. 5, pp. 72–75.
11. Golovin Yu.I., Shibkov A.A. Bystroprotekayushchie elektricheskie protsessy v plasticheski deformiruemyykh shchelochno-galoidnykh kristallakh [Fast-flowing electrical processes in plastically deformable alkali halide crystals]. *Fizika tverdogo tela – Soviet physics, Solid state*, 1987, vol. 28, no. 11, pp. 3492–3499. (In Russian).
12. Yakovitskaya G.E. *Metody i tekhnicheskie sredstva diagnostiki kriticheskikh sostoyanii gornyykh porod na osnove elektromagnitnoi emissii* [Methods and technical means of diagnosing critical states of rocks based on electromagnetic emission of rocks]. Novosibirsk, Parallel' Publ., 2008. 314 p.
13. Vostretsov A.G., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. *Sposob prognoza razrusheniya gornyykh porod* [The method of forecasting the destruction of rocks]. Patent RF, no. 2426880, 2011.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Вострецов Алексей Геннадьевич – родился в 1955 году, д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теория устойчивого обнаружения, различения и оценки сигналов в условиях априорной неопределенности. Опубликовано свыше 150 научных работ, в том числе 3 монографии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vostretsov@adm.nstu.ru).

Vostretsov Aleksey Gennadiyevich (b. 1955) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, vice-rector for scientific work at the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the theory of stable detection, differentiation and estimation of signals under condition of a priori uncertainty. He is the author more than 150 publications including 3 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vostretsov@adm.nstu.ru).



Бизяев Алексей Анатольевич – родился в 1979 году, старший преподаватель кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: прогнозирование динамических проявлений горного давления. Опубликовано свыше 20 научных работ, в том числе одна монография. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: bizyaev@ngs.ru).

Bizyaev Aleksey Anatolevich (b. 1979) – Senior Lecturer department of construction and technology of radio-electronic devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on forecasting of dynamic manifestations of rock pressure. He is the author of more than 20 scientific papers including 3 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: bizyaev@ngs.ru).



Яковицкая Галина Евгеньевна – родилась в 1944 году, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Область научных интересов: прогнозирование динамических проявлений горного давления, аппаратура регистрации электромагнитного излучения. Опубликовано свыше 300 научных работ, в том числе 2 монографии. (Адрес: 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54. E-mail: yge@ngs.ru).

Yakovitskaya Galina Evgeniyevna (b. 1944) – Doctor of Sciences (Eng.), Principal Researcher at the Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. Her research interests are currently focused on forecasting dynamic manifestations of rock pressure. She has published more than 300 research papers including 2 monographs. (Address: 54, Krasnyi Prospekt, Novosibirsk, 630091, Russia. E-mail: yge@ngs.ru).

Статья поступила 17 июня 2018 г.

Received June 17, 2018

 To Reference:

Vostretsov A.G., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Eksperimental'nye issledovaniya po sinkhronnoi registratsii mekhanicheskikh i elektromagnitnykh parametrov signalov EMI pri nagruzhении obraztsov gornykh porod [Experimental investigations on synchronous recording of mechanical and electromagnetic parameters of EMP signals under loading of mineral rocks]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 3 (40), pp. 38–46. doi: 10.17212/1727-2769-2018-3-38-46.