

УДК 53.091:550.37

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭМИССИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
ПОСЛЕ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ

А. А. Беспалько¹, Л. В. Яворович¹, А. А. Еременко², В. А. Штирц³

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

E-mail: besko48@tpu.ru, просп. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия,

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: eremenko@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

³Gornaya Shoria Division, EVRAZRUDA,

E-mail: Vladimir.Shtirts@evraz.com, г. Таштагол, Кемеровская обл., Россия

Приведены результаты физического моделирования связи параметров электромагнитных откликов на низкоэнергетические ударные воздействия в массиве горных пород Таштагольского железорудного месторождения. Установлено, что множественные низкоэнергетические серии ударов вызывают первоначальное повышение амплитуды электромагнитных сигналов с последующим понижением до одного уровня. Это обстоятельство свидетельствует о том, что регистрируемые после технологических взрывов медленно меняющиеся уровни электромагнитных сигналов породного массива обусловлены сдвижением горных пород по различным плоскостям скольжения. Изменения напряженно-деформированного состояния горных пород протекают медленно, в течение единиц и десятков часов.

Электромагнитная эмиссия, горная порода, взрыв, месторождение, амплитуда, трение

DOI: 10.15372/FTPRPI20180202

В [1, 2] показано, что изучение параметров электромагнитных сигналов (ЭМС) и характеристик электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) массивов горных пород и их связей с изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива наиболее эффективно проводить после технологических взрывов большой мощности с массой от десятков до сотен тонн взрывчатого вещества в шахтах рудников. Такие взрывы горных пород используются в технологии добычи полезных ископаемых [3]. Крепкие породы накапливают большую потенциальную энергию, которая способствует развитию геодинамических событий разного класса, в том числе и с энергией до 10^9 Дж. После технологических взрывов формирование и развитие геодинамических событий сжато во времени и пространстве, что отражается в большом количестве проявлений, фиксируемых сейсмическими наблюдениями [4]. Геодинамические события на Таштагольском железорудном месторождении концентрируются в окрестностях выработок как по горизонтали, так и по вертикали. При этом основной их поток наблюдается в течение 24–48 ч после взрывов. В период проведения очистных работ также отмечаются геодинамические события, но их последовательность значительно реже по времени [4–6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 11.980.2017/4.6).

Натурные измерения электромагнитной эмиссии и акустических откликов на геодинамические события на Таштагольском железорудном месторождении, а также сейсмические наблюдения на различных глубинах после технологических взрывов показали связь характеристик ЭМЭ с изменениями напряженно-деформированного состояния породного массива [2, 7]. Такая же связь параметров электромагнитных сигналов и геодинамических явлений указывается в [8, 9]. Результаты модельных экспериментов в лабораторных условиях на образцах горных пород при нагружении одноосным сжатием подтвердили связь параметров сигналов и характеристик эмиссии с процессами разрушения [10–12].

По характеристикам электромагнитной эмиссии и параметрам электромагнитных сигналов выявлены три основных типа геодинамических событий. Первый тип подготовки и проявления геодинамических событий длится в течение секунд и минут. В этот период происходит быстрое нарастание и спад электромагнитной активности горных пород, фиксируемой по амплитуде эмиссии. Второй тип имеет продолжительность десятки минут с более медленным нарастанием и резким спадом амплитуды в регистрируемом частотном диапазоне. При этом спад амплитуды эмиссии может быть медленным, если отсутствуют геодинамические проявления, фиксируемые на сейсмограммах или пьезоэлектрическими регистраторами. Третий тип длится в течение единиц и десятков часов с медленным нарастанием амплитуды эмиссии и ее медленным спадом [1, 2]. Многочисленные измерения характеристик электромагнитной эмиссии показали, что возможны комплексные по длительности этапы подготовки и проявления геодинамических событий. Причем после всех типов подготовки и прохождения геодинамических явлений регистрируемые значения характеристик электромагнитной эмиссии могут переходить на более низкие уровни в зависимости от степени разгрузки массива и наличия остаточных напряжений в нем.

На рис. 1 приведен пример медленных изменений в течение 36 ч интенсивности электромагнитного потока и акустической эмиссии (АС), зарегистрированных во время и после осуществления технологического взрыва на Таштагольском руднике в блоке 6 между горизонтами –140 и –210 м. Глубина залегания горизонтов 590 и 660 м соответственно. Измерения велись непрерывно в течение 65 ч с помощью регистратора РЭМС1 [3]. Для уменьшения количества информационных данных регистрируемые интенсивность электромагнитного потока в диапазоне 1–100 кГц и амплитудные характеристики ЭМЭ в интервалах с добротностью не более 5 с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц, а также в широкой полосе 1–100 кГц усреднялись автоматически каждые 5 с. Параллельно пьезоэлектрическим датчиком измерялась интенсивность акустической эмиссии горных пород. При этом конусный наконечник датчика забивали в горную породу не далее чем 2 м от места расположения принимающего емкостного электромагнитного датчика.

На рис. 1а видно, что интенсивность электромагнитной эмиссии после взрыва нарастает до определенных значений и медленно спадает через 3 ч. В дальнейшем идет медленное понижение уровня ЭМЭ. Через 15 ч после взрыва наблюдается снижение интенсивности эмиссии, продолжавшееся около часа, ниже уровня, зарегистрированного до момента взрыва. На ход этой зависимости оказывают влияние и импульсные изменения электромагнитной эмиссии, соответствующие измеренной интенсивности акустической эмиссии (рис. 1б). Для уверенного выявления связей характеристик электромагнитной эмиссии и изменений НДС породного массива использовались пьезоэлектрические приемники с более высокой чувствительностью, чем у сейсмических датчиков.

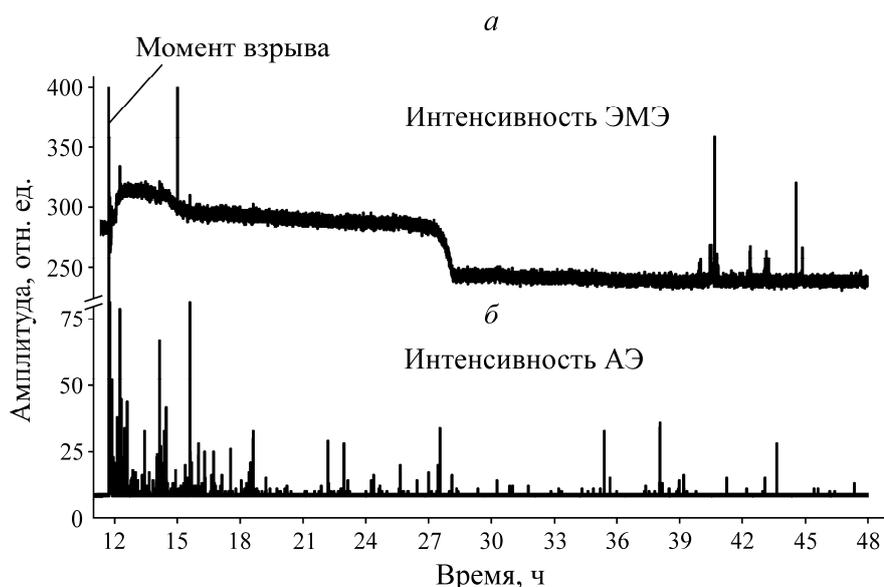


Рис. 1. Изменения в течение 36 ч интенсивности электромагнитного потока (а) и акустической эмиссии (б), зарегистрированные во время и после проведения технологического взрыва массива горных пород в шахте Таштагольского железорудного месторождения в блоке 6 между горизонтами –140 и –210 м

Для установления причин изменения характеристик электромагнитной эмиссии проведено физическое моделирование возбуждения электромагнитных сигналов в массиве горных пород Таштагольского рудника с помощью ударника специального пневматического устройства, разработанного в Институте горного дела СО РАН. Как показал комплексный анализ электромагнитной и акустической эмиссий, а также сейсмических данных наблюдений Таштагольской сейсмической станции, медленные изменения ЭМЭ не имели объективных физических объяснений, так как сейсмическая станция не фиксировала существенных геодинамических проявлений в этот период.

Цель данных исследований — выявление изменений интенсивности электромагнитной эмиссии при постоянно действующих импульсных источниках акустического возбуждения породного массива, вызванных зарождением, подготовкой и проявлением геодинамических событий.

Испытания проходили на горизонте –350 (глубина 800 м) в орте 8. На этом последнем по глубине горизонте и на выше простирающемся горизонте –280 (глубина 730 м) в период экспериментальных измерений буровые, очистные и строительные работы не велись. Используемое в эксперименте пневматическое ударное устройство развивало усилие около 90 Дж с частотой 1 Гц. Удары осуществлялись серийно, количество их увеличивали от серии к серии. Параметры электромагнитных сигналов измерялись регистратором РЭМС1 с усреднением амплитуды, равным 1 с, и РЭМАС1 с усреднением амплитуды 10 мс [4]. Для приема сигналов служили индукционные датчики ДИП. Регистраторы показали практически идентичные результаты. Однако наиболее точные измерения выполнены с помощью регистратора РЭМАС1, так как усреднение амплитуд сигналов имело более короткий промежуток в реальном режиме времени.

На рис. 2 приведены результаты измерения амплитуды выбранных спектральных составляющих электромагнитных сигналов на частотах 1 и 13 кГц. Данные получены при измерении регистратором РЭМАС1 в первой серии ударов пневматическим ударником по массиву горных пород в течение 60 с.

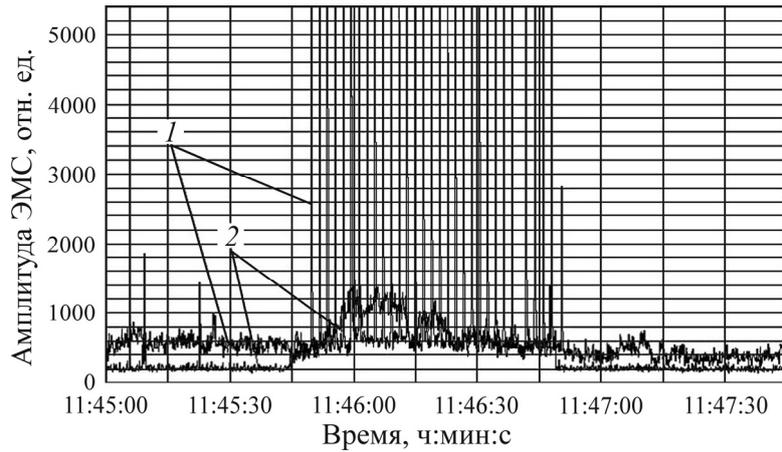


Рис. 2. Изменение амплитуды спектральных составляющих электромагнитной эмиссии горных пород на выбранных частотах при воздействии первой серии ударов пневматическим ударником в течение 60 с: 1 — 1 кГц; 2 — 13 кГц

Всего выполнено восемь серий ударов, продолжительность которых с четвертой серии дискретно увеличивалась. На рис. 3 представлена последняя более длительная по времени последовательность серий ударов пневматическим ударником, продолжительность которой составляла 430 с.

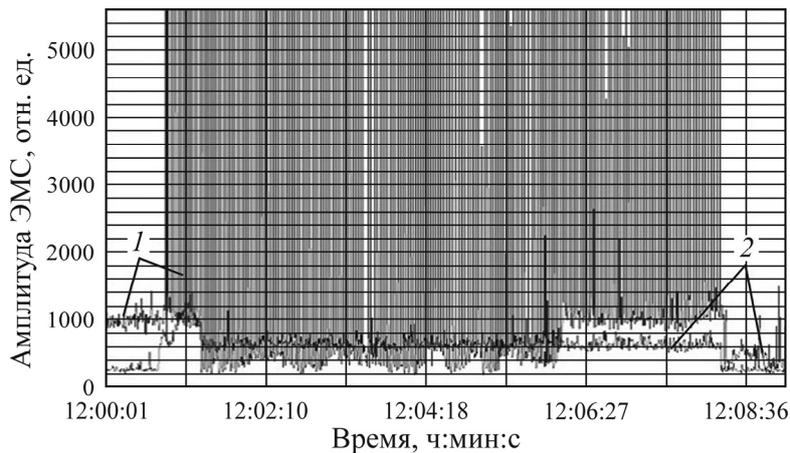


Рис. 3. Фрагмент изменения амплитуды спектральных составляющих электромагнитной эмиссии горных пород на выбранных частотах при воздействии серии ударов пневматическим ударником в течение 430 с: 1 — 1 кГц; 2 — 13 кГц

Во время экспериментов исследуемый массив горных пород находился в положении равновесия, т. е. не происходило никаких других специальных технических и природных внешних механических воздействий.

Совместный анализ результатов измерений амплитуд электромагнитной и акустической эмиссий, записанных регистраторами РЭМС1, и данных измерений амплитуд выбранных спектральных составляющих ЭМС горных пород, зарегистрированных РЭМАС1, при воздействии серий ударов показал их идентичность и очень важную закономерность.

Как видно из рис. 2, 3, в начале серии ударов амплитуда возбуждаемых электромагнитных сигналов возрастает по закону, близкому к линейному. Затем происходит уменьшение усредненной амплитуды электромагнитных сигналов до определенного значения и держится на всем вре-

менном диапазоне последующих ударов в серии. Вероятно, это связано с тем, что последующие периодические удары возбуждают акустические импульсы, которые вызывают вынужденные колебания двойных электрических слоев в горных породах. Рассмотрим такой случай детально.

В массив горных пород подавали детерминированные акустические сигналы в виде импульсного воздействия колоколообразной формы. Распространение акустических сигналов в твердотельных материалах, в том числе в горных породах, в одномерном приближении описывается следующими уравнениями акустики [13]:

$$\frac{du(x, t)}{dt} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{dp(x, t)}{dt} + \rho_0 a_0^2 \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = 0.$$

Здесь $u(x, t)$ — скорость смещения точек среды; $p(x, t)$ — давление; ρ_0 — плотность; a_0 — скорость распространения ультразвука в среде.

Распределение давления P в упрощенном виде в точке на границах контактирующих минералов, слоев или на берегах трещин будет зависеть только от времени $f(t) = P(x_0, t)$. Результат воздействия этого возмущения на границу раздела представляется уравнением

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = \lambda f(t),$$

где x — отклик динамической системы на возмущение, который является величиной, пропорциональной пространственной координате двойного электрического слоя, и соответствует отклонению слоя от положения равновесия; ω — резонансная частота колебаний динамической системы, находящаяся в диапазоне акустических частот; β — коэффициент демпфирования, отражающий затухание процесса; $f(t)$ — импульсное акустическое воздействие в фиксированной точке, т. е. давление на границе раздела сред, где сосредоточены двойные слои; λ — коэффициент, влияющий только на амплитуду колебаний, который можно приравнять к единице. За счет волн отражения и преломления на границах блоков [14] массива горных пород, на контактах минералов и берегах трещин возникает n импульсных функций $f_n(t)$ с разной амплитудой.

Резонансные частоты ω_n зависят от размеров блоков, трещин, ширины границ раздела, угла наклона электрического или магнитного диполей по отношению к направлению падающей акустической волны. Поскольку динамическая система может входить в состояние резонанса при внешнем возмущении (акустическом сигнале), то при резонансной частоте ω_i относительный вклад в спектре регистрируемого электромагнитного сигнала будет максимальным.

Коэффициент затухания в массиве горных пород β определяется “вязкостью” и упругостью системы. В спектре регистрируемого сигнала величина β обусловлена шириной спектра. Чем уже спектр, тем меньше значение β и тем медленнее происходит затухание колебаний динамической системы. В месте проведения эксперимента значения коэффициента β достаточно велики и находятся в интервале $10^1 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ в зависимости от блочности массива горных пород и скорости звука в них [15, 16].

Следует отметить, что характер вынужденных колебаний задается параметрами внешней силы и свойствами возбуждаемых горных пород. В начале действия периодических импульсных внешних сил (удары с помощью пневмоустройства) характер колебаний горных пород изменяется со временем. Здесь еще колебания горных пород не являются упорядоченными. По

прошествии некоторого времени в близлежащем возбуждаемом объеме горных пород формируются периодические вынужденные колебания с периодом, равным либо частоте следования ударов, либо основным частотам возбуждающего акустического импульса. При этом возбуждаемый объем за счет отражения от границ блоков горных пород формирует дополнительный килогерцовый частотный диапазон акустических колебаний. Установление вынужденных колебаний в возбуждаемом объеме тем быстрее, чем больше коэффициент β в объеме горных пород [17]. При начале возбуждения в части породного массива, ограниченного процессами затухания акустических импульсов, одновременно возникают собственные и вынужденные колебания блоков горных пород. В начальный момент времени амплитуды их равны, но противоположны по фазе. Если в начальный период возбуждения горных пород с большой вероятностью существуют собственные колебания, близкие по частоте с периодом ударов к основным частотам возникающих акустических импульсов, то переходной процесс, во время которого сосуществуют собственные и вынужденные колебания, может сопровождаться биениями амплитуды акустических колебаний. Заметим, что поскольку возбуждающие акустические импульсы близки по амплитуде, то и установившиеся вынужденные колебания объема горных пород также будут близки. В результате под действием вынужденных колебаний происходят акустико-электромагнитные преобразования на границах минералов и слоев, на трещинах или контактах различных минеральных включений и генерируются электромагнитные отклики горных пород. В соответствии с изменением амплитуды установившихся вынужденных колебаний электромагнитные сигналы будут иметь более высокую амплитуду с последующим понижением ее до определенного уровня.

Модельные эксперименты, показавшие уменьшение амплитуды электромагнитной эмиссии от последующих ударов, равных по энергии первоначальным ударам, позволили объяснить явление плавного изменения параметров электромагнитной эмиссии после некоторых мощных технологических взрывов (см. рис. 1). Такие изменения хода амплитуды ЭМЭ в период релаксации породного массива после технологических взрывов большой мощности наблюдались не каждый раз. На рис. 1 кроме плавных отмечаются и пиковые изменения эмиссии. Это указывает на то, что после взрыва происходит медленное сдвигание массива горных пород с разной скоростью и с перераспределением НДС по разломам и другим плоскостям скольжения [18]. Пиковые значения амплитуды электромагнитной эмиссии отображают наиболее мощные по энергии сколы при перемещении породной массы или ускоренное их сдвигание в этот промежуток времени.

Мониторинг таких сдвижений массива горных пород на Таштагольском руднике выполняется постоянно по изменению расстояний между реперами, закрепленными в массиве горных пород и выходящими в свободное пространство проходок [19, 20]. Сдвигание массива горных пород сопровождается множественными механическими сколами, трещинообразованием и акустической эмиссией. В результате совокупности трения породных масс и трещинообразования при перемещении, а также воздействия возникающих акустических сигналов на двойные электрические слои, всегда присутствующие в горных породах, появляются электромагнитные отклики, амплитуда которых изменяется плавно на определенном уровне значений в соответствии с энергией механического воздействия. На это указывают результаты физического моделирования при воздействии на массив низкоэнергетическими ударами. Появление акустических и электромагнитных сигналов большой амплитуды обусловлено нарушениями сплошности массива с повышенной запасенной энергией.

Для подтверждения возникновения и изменения параметров электромагнитного сигнала при трении и скольжении горных пород в массиве проведено моделирование трения в лабораторных условиях с использованием разнородных блоков горных пород. Неподвижным блоком выбран монолитный образец среднезернистого розово-красного гранита размером $0.9 \times 0.4 \times 0.2$ м, одна из сторон которого имеет плоскую нешлифованную поверхность. Твердость гранита соответствует 7 по шкале Мооса. В качестве второго блока использовали образец калиевого полевого шпата размером $0.09 \times 0.07 \times 0.03$ м, имеющего твердость, близкую к 6 по шкале Мооса, который являлся подвижным элементом при трении между поверхностями блоков. На рис. 4 приведена характерная зависимость изменения интенсивности электромагнитных сигналов при трении образцов калиевого полевого шпата и гранита. Циклическое трение проводили с частотой 2 Гц в течение 60 с на 25 см поверхности гранита, перед этим не участвующей в процессе трения. Эксперимент с трением блоков гранита и калиевого полевого шпата повторялся 5 раз с перерывами не менее 10 мин.

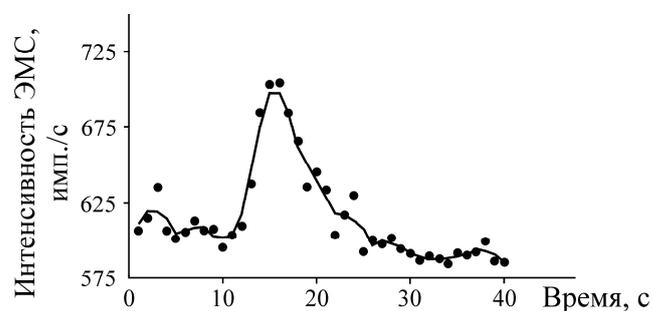


Рис. 4. Изменение интенсивности электромагнитных сигналов при трении образца калиевого полевого шпата о гранит

Интенсивность электромагнитного сигнала записывали во встроенную память регистратора РЭМС1 с усреднением данных мониторинга за 1 с. Средний разброс измерений в пяти проведенных экспериментах составил не более 14%. В начале эксперимента амплитуда интенсивности сигнала возрастала на 35 имп./с, в интервале от 10 до 15 с — на 100 имп./с. После 15 с количество импульсов плавно уменьшалось, а после 25 с устанавливалось практически на одном уровне. Здесь возрастание и спад интенсивности электромагнитного сигнала обуславливался хрупким выкрашиванием, скалыванием, смятием и срезанием частиц на поверхности блока калиевого полевого шпата, поскольку его твердость меньше, чем у гранита. Некоторое понижение уровня интенсивности сигнала относительно первоначального с большой вероятностью вызвано уменьшением количества неровностей на трущейся поверхности блока калиевого полевого шпата.

ВЫВОДЫ

Установлено, что многократные низкоэнергетические серии ударов в массиве горных пород возбуждают первоначально электромагнитные сигналы повышенной амплитуды с последующим ее снижением до одного установившегося уровня. Такие же серии низкоэнергетических ударов возникают в результате совокупности сколов и трещинообразования при перемещении массива горных пород по плоскостям скольжения и разломам. После этого, а также воздействия возникающих акустических сигналов на двойные электрические слои появляются электромагнитные отклики горных пород массива, амплитуда которых изменяется плавно на определенном уровне значений в соответствии с энергией, выделяющейся при сдвигении массива горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bespal'ko A. A., Yavorovich L. V., Viitman E. E., Fedotov P. I., and Shtirts V. A.** Dynamoelectric energy transfers in a rock mass under explosion load in terms of the Tashtagol mine, *J. of Mining Science*, 2010, Vol. 46, No. 2. — P. 136–142.
2. **Беспалько А. А., Яворович Л. В., Бомбизов А. А., Лоцилов А. Г.** Регистратор электромагнитных сигналов для контроля изменений напряженного состояния горных пород // *Контроль. Диагностика*. — 2011. — № 11. — С. 14–17.
3. **Еременко А. А., Федоренко А. Н., Копытов А. И.** Проведение и крепление горных выработок в удароопасных зонах железорудных месторождений. — Новосибирск: Наука, 2008. — 235 с.
4. **Еременко А. А., Беспалько А. А., Еременко В. А., Яворович Л. В.** Диагностика геофизических предвестников геодинамических явлений и развитие геотехнологий разработки железорудных месторождений. — Новосибирск: Наука, 2016. — 296 с.
5. **Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г.** Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. — М.: Недра, 1985. — 271 с.
6. **Егоров П. В., Штумпф Г. Г., Ренев А. А., Шевелев Ю. А., Махраков И. В., Сидорчук В. В.** Геомеханика. — Кемерово: КГТУ, 2002. — 339 с.
7. **Соболев Г. А., Демин В. М.** Кинетика электромагнитного и акустического излучений как предвестник неустойчивости контактов блоков // *ДАН СССР*. — 1988. — Т. 303. — № 4. — С. 834–836.
8. **Lasukov V. V., Mastov S. R.** Electromagnetic precursor of rock collapse, *J. of Mining Science*, 1993, Vol. 29, No. 2. — P. 106–110. <https://doi.org/10.1007/BF00733458>.
9. **Lasukov V. V.** Ozone, percolation and aerosol mechanisms of an electromagnetic earthquake predictor, *Russian Physics J.*, 2000, Vol. 43, No. 2. — P. 143–148. <https://doi.org/10.1007/BF02508602>.
10. **Ivanov V. V., Egorov P. V., Kolpakova L. A., and Pimonov A. G.** Crack dynamics and electromagnetic emission by loaded rock masses, *Soviet Mining*, 1988, Vol. 24, No. 5. — P. 406–412.
11. **Яковицкая Г. Е.** Исследование спектральных характеристик и затухания сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 1991. — 19 с.
12. **Gordeev V. F., Lasukov V. V.** Physics of the electromagnetic emission method of quality control of materials and its prospects, *Russian Physics J.*, 2001, Vol. 44, No. 7. — P. 771–778.
13. **Голямин И. П.** Ультразвук. Маленькая энциклопедия. — М.: Сов. энцикл., 1979. — 400 с.
14. **Oparin V. N., Yushkin V. F., Akinin A. A., and Balmashova E. G.** A new scale of hierarchically structured representations as a characteristic for ranking entities in a geomedium, *J. of Mining Science*, 1998, Vol. 34, No. 5. — P. 387–401.
15. **Горная энциклопедия.** Рубрики: Геология полезных ископаемых. Акустические свойства горных пород. — М.: Сов. энцикл., 1984–1991.
16. **Ржевский В. В., Ямщиков В. С.** Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. — М.: Наука, 1973. — 224 с.
17. **Хайкин С. Э.** Физические основы механики. — М.: Наука, 1971. — 752 с.
18. **Lobanova T. V., Novikova E. V.** Rock movement at the Tashtagol iron-ore deposit in the course of large-scale underground blasting, 2008, Vol. 44, No. 3. — P. 245–252.
19. **Сашурин А. Д.** Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. — 268 с.
20. **Лобанова Т. В.** Сдвигение горных пород Таштагольского месторождения как отражение геодинамических процессов // *Вестн. СГИУ*. — 2012. — № 1. — С. 6–22.

Поступила в редакцию 19/XI 2017