

# ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

*научный журнал*

Основан в 1965 г.  
Выходит 6 раз в год

Учредители:  
Сибирское отделение РАН  
Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН

## *Главный редактор*

чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф. **В. Н. Опарин**

## *Заместитель главного редактора*

д.ф.-м.н. **Л. А. Назаров**

## *Ответственный секретарь*

д.т.н., проф. **В. М. Серяков**

## *Редакционная коллегия*

Д.т.н., проф. А. А. Барях, акад., д.ф.-м.н., проф. И. В. Бычков, чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Г. И. Грицко, д.т.н., проф. С. Г. Емельянов, чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Д. Р. Каплунов, чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. В. И. Клишин, д.т.н., проф. А. А. Козырев, д.т.н. С. А. Кондратьев, д.т.н., проф. С. В. Корнилков, д.т.н., проф. А. В. Корчак, акад., д.т.н., проф. М. В. Курленя, д.т.н., проф. В. П. Мазикин, акад., д.т.н., проф. Ю. Н. Малышев, акад., д.т.н., проф. Н. Н. Мельников, д.т.н., проф. В. Е. Миренков, д.т.н. А. А. Ордин, д.т.н. Н. А. Попов, д.т.н., проф. В. П. Потапов, чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Л. А. Пучков, д.т.н., проф. И. Ю. Рассказов, д.ф.-м.н., проф. А. Ф. Ревуженко, д.т.н. А. Г. Секисов, д.т.н. Б. Ф. Симонов, д.т.н., проф. Б. Н. Смоляницкий, д.т.н. А. П. Тапси́ев, д.т.н. С. М. Ткач, акад., д.т.н., проф. К. Н. Трубецкой, д.т.н., проф. А. М. Фрейдин, акад., д.т.н., проф. В. А. Чантурия, д.ф.-м.н., проф. А. И. Чанышев, к.т.н. В. И. Ческидов, д.ф.-м.н. Е. Н. Шер, д.т.н., проф. В. Л. Шкуратник, чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. В. Л. Яковлев, д.т.н., проф. Д. В. Яковлев

## *Международный редакционный совет*

Д.т.н., проф. М. В. Айзенберг-Степаненко (Израиль), чл.-корр. НАН Украины, д.т.н., проф. А. В. Анциферов (Украина), акад. НАН КР, д.т.н., проф. И. Т. Айтматов (Кыргызстан), д.ф.-м.н. А. А. Баймухаметов (Казахстан), проф. В. Буш (Германия), акад., проф. С. Вуйич (Сербия), проф. Р. Гангули (США), проф. О. Гювен (Турция), проф. П. Дауд (Австралия), проф. Р. Димитракопулос (Канада), проф. К. Дребенштедт (Германия), проф. Й. Дубинский (Польша), проф. А. Касали (Чили), проф. П. Кноль (Германия), проф. М. Коли (Италия), чл.-корр. НАН КР, д.т.н., проф. К. Ч. Кожогоулов (Кыргызстан), проф. Д. Колимбас (Австрия), д.т.н. В. А. Мансуров (Казахстан), проф. Р. Миннит (Южная Африка), проф. Пан И-Шан (Китай), проф. К. Пинто (Бразилия), проф. Л. Тотев (Болгария), акад., проф. Цянь-Циху (Китай)

*Журнал переводится на английский язык и издается в США Международной академической компанией "Наука / Интерпериодика" по контракту с Kluwer Academic / Plenum Publishers под названием "Journal of Mining Science"*

## *Заведующая редакцией* **В. Н. Валиева**

*Адрес редакции:* Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия.  
Тел.: (383) 217-00-48. Факс: (383) 217-06-78. E-mail: [edit@misd.nsc.ru](mailto:edit@misd.nsc.ru)  
<http://www.sibran.ru/ftpwpw.htm>, [www.misd.nsc.ru/publishing/jms](http://www.misd.nsc.ru/publishing/jms)

**Новосибирск**  
**Издательство Сибирского Отделения РАН**

---

© Сибирское отделение РАН, 2015  
© Институт горного дела СО РАН, 2015

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ

НОМЕР 1, 2015

ЯНВАРЬ – ФЕВРАЛЬ

**ГЕОМЕХАНИКА**

*Г. Г. Кочарян, А. А. Остапчук*

Акустическая эмиссия при различных режимах межблоковых перемещений 3

*А. П. Бобряков, В. П. Косых, А. Ф. Ревуженко*

Триггерное инициирование разрядки упругой энергии в напряженной геосреде 14

*Л. А. Назарова, Л. А. Назаров, М. Д. Джаманбаев, М. К. Чаныбаев*

Эволюция термогидродинамических полей в окрестности защитной дамбы хвостохранилища рудника Кумтор (Кыргызская Республика) 23

*А. С. Вознесенский, Я. О. Куткин, М. Н. Красилов*

Взаимосвязь акустической добротности с прочностными свойствами известняков 30

*А. Г. Протосеня, М. А. Карасев, Н. А. Беляков*

Разработка численной модели прогноза предельного состояния массива с использованием критерия прочности Ставрогина 40

*А. В. Федоров, А. В. Шульгин*

Влияние неравновесности десорбции на структуру ударных волн и волн разрежения в угольном пласте 49

*Г. Л. Линдин, Т. В. Лобанова*

Потоки энергии в задачах о действии штампа на полуплоскость 55

*С. М. Простов, Н. А. Смирнов, С. П. Бахаева*

Прогноз физико-механических свойств намывного массива по данным электрических зондирований 69

**РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

*П. Н. Тамбовцев*

Физическое моделирование процесса отделения блочного камня от массива ударным воздействием на пластичное вещество в шпуре 79

**ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

*Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова, Д. Н. Радченко*

Проблема использования возобновляемых источников энергии в ходе разработки месторождений твердых полезных ископаемых 88

*В. С. Литвинцев*

Проблемы рационального освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в восточных районах России 97

<i>А. А. Ордин, А. М. Никольский, А. Ю. Цивка</i>	
Технико-экономический анализ эффективности камерно-столбовой системы разработки шахты “Инаглинская” Южно-Якутского угольного бассейна	105
<i>Г. Д. Першин, Н. Г. Караулов, М. С. Уляков</i>	
Выбор способа подготовки высокопрочного камня к выемке с учетом условий залегания природных трещин в массиве	111
<b>РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА</b>	
<i>А. М. Красюк, И. В. Лугин, А. Ю. Пьянкова</i>	
Определение размеров массива грунта, подверженного тепловому влиянию подземных станций и тоннелей метрополитена	122
<b>ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ</b>	
<i>А. В. Курков, А. В. Егоров, С. Н. Щербакова</i>	
Технология комплексного обогащения гематит-мартитовых руд	129
<i>С. А. Кондратьев, Н. П. Мошкин</i>	
Оценка собирательной силы флотационного реагента	137
<i>В. Д. Самыгин, П. В. Григорьев</i>	
Моделирование влияния гидродинамических факторов на селективность процесса флотации. Ч. 1. Влияние диаметра пузырька и диссипации турбулентной энергии	145
<i>Ю. А. Миргород, С. Г. Емельянов</i>	
Комплексная технология получения наноматериалов из бедных руд и отходов	153
<i>И. Г. Антропова, А. Ю. Дамбаева</i>	
Метод сульфидирования труднообогатимых окисленных минералов свинца и цинка в атмосфере водяного пара	163
<b>ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ</b>	
<i>А. Б. Логов, В. Н. Опарин, В. П. Потапов, Е. Л. Счастливцев, Н. И. Юкина</i>	
Энтропийный метод анализа состава техногенных вод горнодобывающего региона	168
<b>ХРОНИКА</b>	
Проблемы развития горных наук и горнодобывающей промышленности (к итогам конференции, посвященной 70-летию Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН)	180
Список статей, опубликованных в журнале в 2014 году	190

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.34; 622.83

### АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ МЕЖБЛОКОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Г. Г. Кочарян<sup>1,2</sup>, А. А. Остапчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер РАН, E-mail: gevorgk@idg.chph.ras.ru,  
Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, E-mail: ostap165@gmail.com,  
Институтский пер. 9, 141700, г. Долгопрудный, Россия

Представлены результаты лабораторных экспериментов, в которых исследован сейсмоакустический эффект, наблюдаемый при различных режимах смещения по границам между блоками горной породы. Тот факт, что косейсмические перемещения при техногенных землетрясениях происходят по существующим границам раздела, служит основанием относительно простой постановки экспериментов на установке “слайдер”-модели. Использование различных материалов в качестве заполнителя трещины позволило смоделировать весь спектр возможных деформационных режимов. Последние, с известной долей условности, можно разделить на три группы. Первая — крип, или стабильное скольжение; вторая — нестабильное скольжение; третья — регулярное прерывистое скольжение, или стик-слип. Показано, что статистика акустических событий, излучаемых в процессе скольжения, описывается распределением Гутенберга–Рихтера. При этом наиболее крупные “характеристические” события при сдвиге происходят квазирегулярно с вероятностью значительно выше, чем следует из закона повторяемости. Установлена функциональная связь между потоком излученной энергии акустической эмиссии (АЭ) и скоростью деформации нарушения сплошности.

*Горно-тектонический удар, техногенное землетрясение, разлом, режим деформирования, акустическая эмиссия, сейсмический мониторинг*

#### ВВЕДЕНИЕ

Горно-тектонические удары и техногенные землетрясения являются наиболее разрушительными проявлениями горного давления. Такие события периодически наблюдаются как при добыче углеводородов (Газли, 1976 и 1984 гг.; Нефтегорск, 1995 г.), так и при разработке твердых полезных ископаемых [1–4]. Так, довольно сильные землетрясения периодически происходят в центральной части Кольского полуострова в результате добычи фосфатов на территории Хибинского горного массива и при извлечениях редкоземельных руд на территории Ловозерского массива. За период с 1989 по 2010 г. на месторождениях Кольского полуострова произошло 12 землетрясений с магнитудой более 3, спровоцированных ведением горных работ. В 90-е годы прошлого столетия в Хибинах ежегодно отмечалось до 10 опасных горно-тектонических

ударов с магнитудой 1.5–2. В настоящее время, в связи с применением специальных мероприятий по разгрузке напряжений в массиве, число таких событий снизилось до 1–3 в год. Освоение месторождений Печерского угольного бассейна привело к тому, что в прежде асейсмическом регионе произошли довольно крупные землетрясения (1995, 2000, 2005, 2012 гг.) с магнитудами до 4. Актуальным примером является невиданная прежде сейсмичность в Кузбассе, где 18.06.2013 г. зарегистрировано сильнейшее Бачатское землетрясение с магнитудой  $M_L = 6.1$  [5]. Это событие оказалось третьим достаточно крупным землетрясением в районе угольного разреза “Бачатский” в течение 2012–2013 гг.

Опасность неконтролируемого изменения состояния земных недр убедительно демонстрируют процессы, происходящие в настоящее время в центральных регионах США, связанные с развертыванием работ по добыче сланцевого газа. Технология разработки таких месторождений требует проведения множества гидроразрывов, а огромное количество использованных при этом токсичных флюидов закачивается в глубокие горизонты для захоронения. Такое воздействие на горный массив вызывает нарушение флюидного режима и напряженного состояния обширных областей. И если в течение многих лет в этом регионе стабильно наблюдалось примерно 20 довольно крупных землетрясений ( $M_L > 3$ ) в год, то после начала интенсивной разработки месторождений в 2001 г. сейсмическая активность начала увеличиваться и в 2011 г. зафиксировано уже не 20, а почти 200 землетрясений [6].

Известно, что в ряде случаев крупным техногенным землетрясениям предшествуют такие явления, как рои более мелких сейсмических событий, трансформация деформационного режима в окрестности разломных зон, разнообразные сейсмоакустические проявления. Развитые на многих горнодобывающих предприятиях системы сейсмического и деформационного мониторинга способны обеспечить наблюдательный материал, пригодный для осуществления прогноза крупных горных ударов, однако зачастую интерпретация получаемых результатов оказывается затрудненной из-за отсутствия адекватных моделей подготовки крупных межблоковых подвижек.

Модели процессов зарождения и эволюции динамических перемещений по границам структурных блоков в массиве горных пород могут быть развиты на основе лабораторных экспериментов, в которых рассматриваются как закономерности трансформации режима деформирования, так и параметры сейсмоакустических импульсов, излучаемых в ходе деформирования и разрушения образцов [7–9]. Весьма перспективными в этом плане являются также исследования, проводимые на основе современных численных методов [9–11].

При проведении лабораторных и численных экспериментов следует иметь в виду, что косейсмические перемещения во время крупных горных ударов и техногенных землетрясений чаще всего происходят по уже существующим поверхностям разломов и крупных тектонических трещин [12, 13]. Таким образом, исследования параметров сейсмоакустической эмиссии при разрушении образцов не могут адекватно описать закономерности подготовки межблоковых подвижек.

Локализация сдвига в очень узкой центральной части разлома [14] может в известной степени служить основанием простой постановки лабораторных экспериментов и поиска качественных соответствий между полученными результатами и явлениями, наблюдаемыми в природе.

В настоящей статье рассматриваются результаты лабораторных экспериментов, направленных на исследование особенностей сейсмоакустических проявлений различных режимов смещений по границе между блоками горной породы.

#### РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ СДВИГОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Долгое время предполагалось, что накопившиеся избыточные напряжения в земной коре снимаются либо посредством землетрясений при “мгновенном” срыве заблокированных участков разломов, либо через непрерывное асейсмическое скольжение. Открытие и исследование в последние два десятилетия таких явлений, как низкочастотные землетрясения, очень низко-