

ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТЬ — ВАЖНЫЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А. А. Козырев, В. И. Панин, О. Г. Журавлева
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Показана взаимосвязь энергонасыщенности геологической среды и сейсмичности в Хибинской горнотехнической системе. Приведены механизмы реализации техногенных землетрясений. Представлено изменение сейсмического режима при разработке удароопасных Хибинских апатит-нефелиновых месторождений. Установлены причины и условия повышения геодинамических рисков при ведении горных работ в геологической среде с низким уровнем природной сейсмичности.

Ключевые слова:

энергонасыщенность геологической среды, горнотехническая система, техногенная сейсмичность, геодинамический риск.

ENERGY SATURATION AS THE IMPORTANT GEOMECHANICAL PARAMETER OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT IN MINING-ENGINEERING SYSTEMS

Anatoliy A. Kozyrev, Victor I. Panin, Olga G. Zhuravleva
Mining Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The relationship between the energy saturation of the geological environment and seismicity in the Khibiny mining-engineering system is indicated. The mechanisms of occurrence of mining-induced earthquakes are presented. A change in the seismic regime during the development of the Khibiny apatite-nepheline deposits is described. The causes and conditions are established which increase geodynamic risks in mining operations in the geological environment with low natural seismicity.

Keywords:

energy saturation of geological environment, mining-engineering system, mining-induced seismicity, geodynamic risk.



Введение

Каждая геологическая среда обладает определенным энергетическим потенциалом, уровень которого зависит от параметров напряженного состояния пород в массиве и который определяет все геомеханические трансформации в горнотехнической системе [1–5].

Основным источником этой энергонасыщенности являются латентные напряжения, появившиеся при генезисе пород, палео- и современные тектонические процессы совместно с техногенными нагрузками. Накопившаяся в геологической среде горнотехнических систем энергия определяет основные закономерности эволюции этих систем, наблюдаемыми проявлениями которой являются деформации пород в массиве и сейсмичность. При этом деформации характеризуют процессы концентрации энергии, а сейсмичность — степень ее релаксации, что в совокупности определяет некоторые стороны энергообмена.

К настоящему времени по сейсмичности в горнотехнических системах Хибинского массива накоплено достаточно информации для анализа его энергонасыщенности и ее динамики в процессе развития горных работ.

Ранее в Горном институте КНЦ РАН с помощью аналитических исследований выполнен анализ энергонасыщенности геологической среды Кольского п-ова: построены карты энергонасыщенности с учетом основных тектонических структур, выделены аномально энергонасыщенные районы, удовлетворительно совпадающие с сейсмогенными зонами (рис. 1), в которых произошли крупные техногенные землетрясения [1, 6]. Дело в том, что Хибинский и Ловозерский массивы, являясь наиболее энергонасыщенными районами на территории Кольского п-ова, вмещают в себя мощные горнотехнические системы, в геомеханических пространствах которых всегда имеют место участки с высокими концентрациями напряжений и сильные триггеры в виде технологических взрывов.

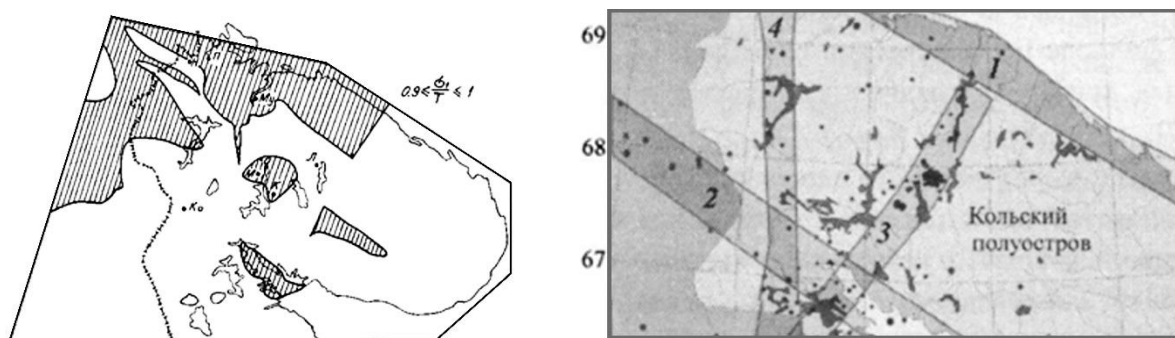


Рис. 1. Зоны повышенной энергонасыщенности в массивах горных пород на территории Кольского п-ова и главные сейсмогенные зоны

Fig. 1. Zones of increased energy saturation in rock massifs of the Kola Peninsula and principal seismic zones

Анализ сейсмичности и энергонасыщенности геологической среды

Энергетический класс наиболее сильных сейсмических событий при отработке апатитовых месторождений Хибинского массива — $K = 9-11$.

Примеры техногенных землетрясений в районе Кировского рудника (Кр):

- в 1989 г. с магнитудой $M \approx 4,2$ [1], что соответствует сейсмической энергии 10^{11} Дж;
- в 2010 г. с магнитудой $M_L = 3,5$ [7] и энергией $9 \cdot 10^9$ Дж (по данным Центра геофизического мониторинга АО «Апатит»).

В Ловозерском массиве на редкометальном руднике «Умбозеро» в 1999 г. произошло крупное техногенное землетрясение с магнитудой $M = 4,4$ и энергией порядка 10^{12} Дж [1].

Площадь подготовки таких событий обычно имеет линейные размеры от сотен метров до нескольких километров. Соотношение между магнитудой M и энергией E землетрясения может быть выражено с помощью одного из известных эмпирических соотношений, например, по формуле Гутенберга — Рихтера [8]:

$$\lg E(\text{эрг}) = 1,5M + 11,8. \quad (1)$$

Согласно расчетам по формуле (1), для произошедших наиболее сильных сейсмических событий с магнитудой от 3,5 до 4,5 энергетический класс составляет от 9 до 12. Такие события в шахтной сейсмологии оцениваются как весьма опасные по проявлениям разрушений и на поверхности, и в подземных выработках.

Согласно современным представлениям о геологической среде рудник с вмещающим его участком массива является открытой динамической нелинейной природно-технической системой, функционирование которой сопровождается чередованием периодов адаптации и бифуркаций (катастроф).

Прогноз опасности горно-тектонического удара или техногенного землетрясения, то есть катастрофы, сводится к определению пространственно-временных границ опасных участков и уровня их критического состояния. Профилактика этих событий должна обеспечивать либо как

можно больший период адаптационного функционирования системы, либо контролируемый выход ее из критического состояния, то есть своевременную управляемую разрядку накопившихся напряжений (энергии).

Важное методологическое значение при этом имеет «фоновый принцип» или фоновая общесистемная закономерность, которая позволяет при определенных условиях по изучению фона судить о состоянии системы [9]. С этой целью проанализированы сейсмические события энергетического класса $K = 3-8$, зарегистрированные на Кировском и Расвумчоррском рудниках АО «Апатит», при этом наиболее высокий фон установлен на Расвумчоррском руднике [10].

Экспериментальными определениями напряжений в нетронутом массиве пород установлены величины субгоризонтальных напряжений, причем наиболее высокие — на Расвумчоррском руднике (месторождение Апатитовый цирк). На Юкспорском и Кукисвумчоррском месторождениях субгоризонтальные тектонические напряжения во вмещающих породах достигают 60 МПа на отметках до 600 м от поверхности, на Расвумчоррском руднике — 70 МПа. В рудной залежи уровень напряжений несколько ниже (табл. 1). Удельный вес пород принят одинаковым $\gamma = 2,7 \text{ т/м}^3$.

Таблица 1
Table 1

Значения главных напряжений на подземных рудниках АО «Апатит»
Values of principal stresses in underground mines, JSC Apatit

Рудник Mine	Величина напряжений, МПа Stress magnitude, MPa					
	во вмещающих породах in host rocks			в рудном теле in ore body		
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3
Расвумчоррский Rasvumchorr	70	28	16	50	27	16
Юкспорское крыло Кр Yukspor side, Kirovsky mine	60	24	16	40	22	16
Кукисвумчоррское крыло Кр Kukisvumchorr side, Kirovsky mine	60	24	16	40	22	16

С учетом установленного уровня действующих в массиве напряжений выполнена приближенная оценка величины удельной энергии w в пределах шахтных полей этих рудников:

$$w = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)], \quad (2)$$

где w — удельная энергия; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Значения свойств для Кукисвумчоррской и Юкспорской частей Кировского рудника приняты одинаковыми. Величина модуля Юнга принята равной $E = 5 \cdot 10^4$ МПа, коэффициента Пуассона (ν) — 0,25. В табл. 3 приведены суммарные объемы вмещающих пород и рудного тела, используемые в дальнейших расчетах.

Запасенная потенциальная энергия пропорциональна рассматриваемому объему выемки горной массы:

$$W = wV. \quad (3)$$

Результаты расчетов потенциальной энергии в пределах шахтных полей представлены на рис. 2.

Таблица 2

Table 2

Удельная энергия деформирования вмещающих пород ($w_{\text{пор}}$) и рудного тела ($w_{\text{руд. тела}}$)
Specific energy of deformation of host rocks $w_{\text{host rocks}}$ and ore body $w_{\text{ore body}}$

Рудник Mine	$w_{\text{пор}}$ (МДж/м ³) $w_{\text{host rocks}}$ (MJ/m ³)	$w_{\text{руд. тела}}$ (МДж/м ³) $w_{\text{ore body}}$ (MJ/m ³)
Расвумчоррский Rasvumchorr	0,042	0,022
Кировский Kirovsky	0,030	0,014

Таблица 3

Table 3

Суммарный объем (V) вмещающих пород и рудного тела
Total volume (V) of host rocks and ore body

Рудник Mine	Расвумчоррский Rasvumchorr	Юкспорское крыло Кр Yukspor side, Kirovsky mine	Кукисвумчоррское крыло Кр Kukisvumchorr side, Kirovsky mine
Объем (V , м ³) Volume (V , m ³)	$8,64 \cdot 10^8$	$6,30 \cdot 10^8$	$7,16 \cdot 10^8$

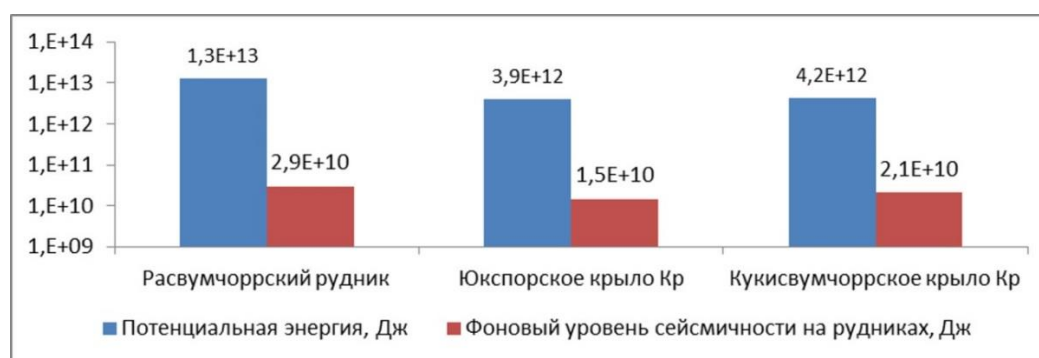


Рис. 2. Потенциальная энергия в пределах шахтных полей и фоновый уровень сейсмичности на рудниках

Fig. 2. Potential energy within mine fields and background level of seismicity in mines

Фоновый уровень сейсмичности на рудниках определен с учетом сроков их работы (с 1929 г. — Кукисвумчоррское крыло Кр, с 1954 г. — Юкспорское крыло Кр и Расвумчоррский рудник).

Соотношение выделившейся сейсмической и потенциальной энергии в пределах рудных полей апатитовых рудников составляет порядка 1 %, что удовлетворительно согласуется с данными об излучаемой энергии при взрыве в твердой породе [11].

Удельная энергия пропорциональна квадрату действующих напряжений (см. формулу 2).

В рудном теле месторождений предел прочности пород при одноосном сжатии составляет величину $[\sigma_c] = 160$ МПа, следовательно, критическая удельная энергия для них — $w^* = 0,256$ МДж/м³. Значения удельной энергии деформирования в рудных телах на порядок ниже критической удельной энергии и не превышают 0,022 МДж/м³ (табл. 2). Аналогично и для вмещающих пород: критическая удельная энергия составляет $w^* = 0,4$ МДж/м³, тогда как значение удельной энергии деформирования не превышает 0,042 МДж/м³ (табл. 2), то есть также на порядок ниже критической.

Как установлено ранее, критические значения напряжений, при которых может произойти разрушение, примерно в 3 раза превышают фоновые напряжения в массиве горных пород, то есть критическая удельная энергия в высоконапряженном участке примерно в 10 раз превышает удельную энергию деформирования. Таким образом, при отсутствии техногенной нагрузки и соответствующей концентрации напряжений в рудах и породах накоплено недостаточно энергии для перехода массива в неустойчивое состояние в виде реализации катастрофических сейсмических событий. Отметим, что если для рудника в целом опасным является событие энергетического класса 9–12, то для локальных участков опасными являются сейсмические события с энергией класса 6–8.

В качестве иллюстрации изменения геодинамического состояния массива в процессе ведения горных работ рассмотрена сейсмическая активность на Кировском руднике, обрабатывающем Кукисвумчорское и Юкспорское месторождения, разделенные Саамским разломом. На графиках (рис. 3, 4) видно, что за последние 10 лет уровень сейсмической активности в пределах обрабатываемых месторождений значительно изменился.

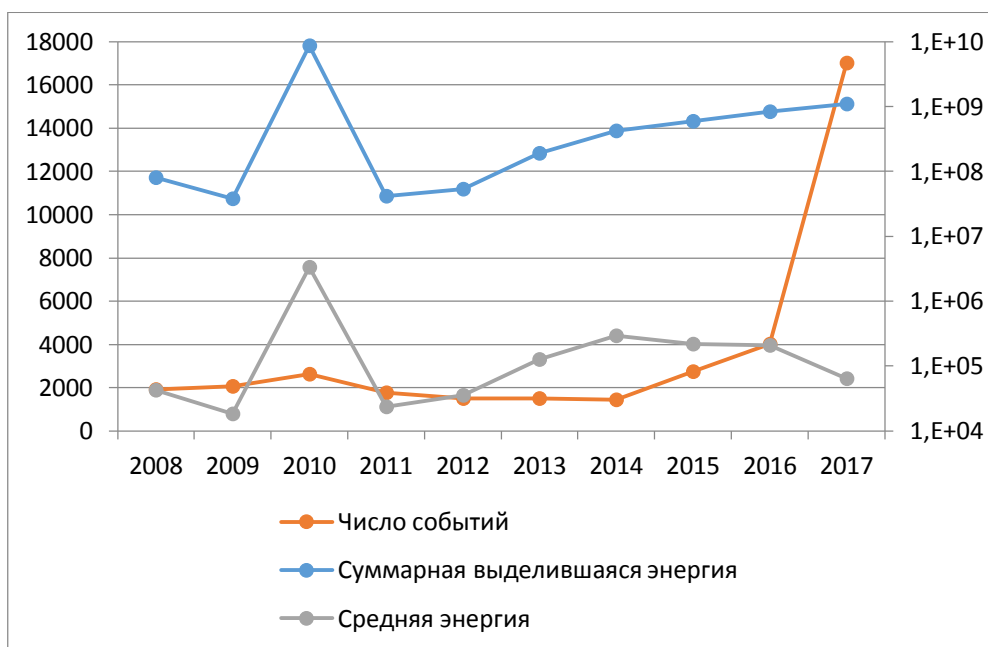


Рис. 3. Сейсмическая активность Кукисвумчорского крыла Кр

Fig. 3. Seismic activity of the Kukisvumchorr side, Kirovsky mine

На Кукисвумчорском крыле Кр (рис. 3) в 2010 г. произошло техногенное землетрясение, что отражается в изменении показателей сейсмического режима. Начиная с 2013 г. наблюдается ежегодный рост суммарной выделившейся энергии, причем в 2017 г. наблюдается значительное увеличение числа слабых сейсмических событий (происходило формирование трещины отрыва в консоли необрушенных пород висячего бока), за счет чего уменьшился показатель средней выделившейся энергии.

На Юкспорском крыле Кр (рис. 4) с 2014 г. наблюдается рост уровня сейсмической активности в связи с тем, что отбойка стыковочной секции спровоцировала лавинообразную стадию прорастания магистральной трещины в основании консольного зависания.

В течение 2017 г. на Кукисвумчорском крыле Кр зарегистрировано 10 сейсмических событий энергетического класса $K = 7$ и 107 сейсмических событий энергетического класса $K = 6$. На Юкспорском крыле — 6 событий энергетического класса $K = 7$ и 380 событий энергетического класса $K = 6$.

Также необходимо отметить, что если в районе Саамского разлома ранее практически не регистрировались сильные сейсмические события, то с приближением горных работ активность разлома заметно возросла: стали происходить сейсмические события энергетического класса $K = 7$ (рис. 5).

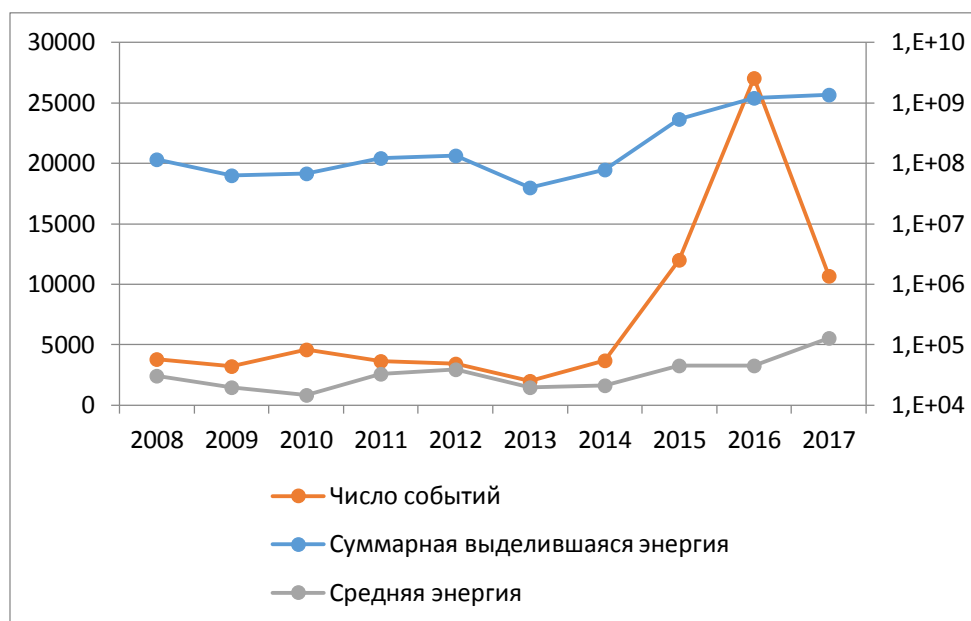


Рис. 4. Сейсмическая активность Юкспорского крыла Кр
Fig. 4. Seismic activity of the Yukspor side, Kirovsky mine

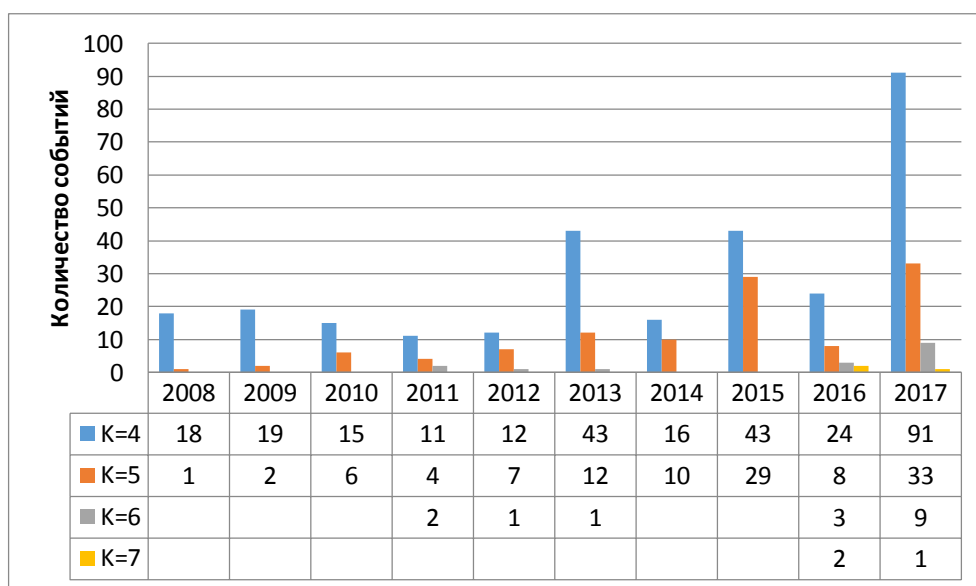


Рис. 5. Распределение по энергетическим классам сейсмических событий, зарегистрированных в районе Саамского разлома (2008–2017 гг.)

Fig. 5. Distribution on energy classes of seismic events registered at the Saamsky fault area (2008–2017)

Заклучение

Таким образом, несмотря на оценку современной сейсмичности на территории Мурманской обл. в целом как на стабильно невысокую [11], геодинамический риск при разработке удароопасных Хибинских и Ловозерских месторождений может быть значительным, что существенно влияет на безопасность горных работ и это подтверждается соответствующей практикой.

При отсутствии техногенной нагрузки и соответствующей концентрации напряжений в рудах и породах накопленной энергии недостаточно, чтобы происходил переход массива в неустойчивое состояние и реализовались катастрофические сейсмические события. Интенсивное ведение горных работ сопровождается локальными концентрациями напряжений, что приводит к изменению геомеханического состояния массива. При достижении критических значений этих параметров реализуются катастрофические сейсмические события, опасные как для рудника в целом, так и для локальных участков.

Проведенные исследования показали, что энергонасыщенность геологической среды является важным фактором, который определяет геомеханическую ситуацию в горнотехнической системе, а соответственно, и безопасность горных работ.

Отражения геодинамических процессов в геологической среде горнотехнических систем проявляются в параметрах деформирования и сейсмичности. При этом доля регистрируемой сейсмической энергии мала, так как большая ее часть идет на деформирование и разрушение горных пород в массиве, выделение тепла и др. Использование энергетических параметров геологической среды может существенно повысить прогностические возможности соответствующих наблюдений, для чего целесообразно продолжить исследования по энергообмену в геологической среде горнотехнических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсмичность при горных работах / А. А. Козырев [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 325 с.
2. Кропоткин П. Н., Поляк Б. Г. Энергетический баланс Земли // Земная кора сейсмоопасных зон. Верхняя мантия. М.: Наука, 1973. № 11. С. 7–24.
3. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
4. Петухов И. М., Лодус Е. В. К балансу энергии при горно-тектонических явлениях // Свойства горного массива и управление его состоянием. 1991. С.114–119. (Тр. ВНИМИ).
5. Пономарев В. С. Энергонасыщенность геологической среды. М.: Наука. 2008. 380 с.
6. Современная сейсмичность на территории Мурманской области и ее проявление в горнопромышленных зонах / Ю. А. Виноградов [и др.] // ФТПРПИ. 2016. № 1. С. 62–70.
7. Сейсмичность Кольского полуострова по инструментальным данным / С. В. Баранов [и др.] // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы 6-й Междунар. сейсмол. шк. 2011. С. 47–51.
8. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 344 с.
9. Спивак А. А. Динамические процессы в земной коре // Геофизика межгеосферных взаимодействий. М.: ГЕОС, 2008.
10. О взаимосвязи энергонасыщенности геологической среды и сейсмичности в горнотехнических системах (на примере Хибинских апатитовых рудников) / А. А. Козырев [и др.] // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы докл. IV Всерос. конф. с междунар. участием, г. Москва, 6–9 июня 2017 г. М.: ГЕОС, 2017. С. 303–310.
11. Адушкин В. В. Сейсмичность взрывных работ на территории европейской части России // Физика Земли. 2013. № 2. С. 110–130.

Сведения об авторах

Козырев Анатолий Александрович — доктор технических наук, профессор, заместитель директора Горного института КНЦ РАН

E-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Панин Виктор Иванович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: panin@goi.kolasc.net.ru

Журавлева Ольга Геннадьевна — кандидат технических наук, научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Anatoliy A. Kozyrev — Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Victor I. Panin — PhD (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of KSC of the RAS

E-mail: panin@goi.kolasc.net.ru

Olga G. Zhuravleva — PhD (Engineering), Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Козырев, А. А. Энергонасыщенность — важный геомеханический параметр геологической среды в горнотехнических системах / *А. А. Козырев, В. И. Панин, О. Г. Журавлева* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 2 (10). — С. 63–70.

Reference

Kozyrev Anatoliy A., Panin Victor I., Zhuravleva Olga G. Energy Saturation as the Important Geomechanical Parameter of Geological Environment in Mining-Engineering Systems. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 2 (10), pp. 63–70 (In Russ.).