

УДК 622.831.232

А.А. Козырев, С.А. Жукова, А.В. Самсонов, А.В. Волков
МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ УЧЕТА
ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ
ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ
ХИБИНСКОГО МАССИВА

Проведена работа по оценке влияния природных факторов на рост сейсмической активности обрабатываемых месторождений Хибинского массива. Определены критические значения по водопритокам и диапазоны значений углов спада высоты снежного покрова, после превышения которых наблюдается всплеск сейсмической активности участков Хибинского массива. Разработаны «Методические принципы оценки влияния метео- и гидрогеологических факторов», позволяющие выявлять причины, опасные периоды и зоны влияния обводненных пород в массиве во время продолжительных дождей и интенсивного снеготаяния, что позволит разрабатывать защитные мероприятия для конкретных опасных зон с учетом фактического состояния массива.

Ключевые слова: сейсмическая активность, мониторинг, обводненность, техногенное землетрясение, водоприток, снеготаяние.

Введение

Акционерное общество «Апатит» разрабатывает месторождения апатит-нефелиновых руд в Хибинских горах Мурманской области: Кукисвумчорское, Юкспорское, «Апатитовый Цирк» и «Плато Расвумчорр». Постоянное усложнение горнотехнических условий ведения горных работ на данных месторождениях происходит за счет интенсификации ведения подземных и открытых работ. При переходе на большие глубины резко ухудшаются условия эксплуатации месторождений, так как происходит рост уровня напряжений и динамических проявлений горного давления.

В результате отработки горизонтов происходит подработка пород всяческого бока, которая вызывает образование зон растяжения в одной части массива и увеличение напряжений сжатия в другой части. При обрушении консоли происходит стабилизация напряжений в зоне влияния горных работ. Такие

разнонаправленные воздействия на массив вызывают его растрескивание и разупрочнение. Разрушаются слабые породы, заполняющие тектонические нарушения. Нарушается равновесие блоковой структуры массива. Со временем образуется больше трещин и магистральных разрывов. Массив постепенно переходит на все более высокие иерархические уровни процесса разрушения за счет слияния зон разупрочнения, вызванных технологическими и тектоническими воздействиями на массив, вероятность мощных геодинамических явлений растет.

На практике в АО «Апатит» наблюдается весь спектр геодинамических явлений: техногенные землетрясения, горно-тектонические удары, толчки, горные удары и микроудары, стрельяние пород, динамическое заколообразование и шелушение.

В последнее десятилетие автоматизированной системой контроля состояния массива (АСКСМ) зарегистри-

стрировано несколько сотен сильных сейсмических событий (энергия более $1.0E+06$ Дж), которые совпадают по времени с периодами наибольшей сезонной обводненности горных пород.

Последние пять лет в районе ведения горных работ чаще фиксируются сейсмические события (с/с) с энергией от $1.0E+06$ Дж до $1.0E+12$ Дж, зарегистрировано 3 техногенных землетрясения. Большинство таких событий сопровождалось разрушениями в подземных выработках, сотрясением земной поверхности и ощущались жителями городов Кировска и Апатиты. Прогнозирование сильных сейсмических событий, провоцируемых повышенной обводненностью массива, предупреждение и минимизация их вредных последствий, представляет собой важную экономическую и социальную проблему, требующую для своего решения глубокой научной проработки. В связи с этим актуальным представляется изучение связи природных факторов, таких как температура, осадки, обводненность горных пород с сейсмическим откликом массива горных пород на них.

Объекты исследования

Расвумчоррский и Центральный рудники разрабатывают единую апатит-нефелиновую залежь, разделенную на два месторождения: «Апатитовый Цирк» и «Плато Расвумчорр». В настоящее время подземным способом отрабатываются горизонты +600 м, +530 м, +470 м и +450 м.

Месторождения «Апатитовый Цирк» и «Плато Расвумчорр» расположены в зоне аэрации, которая характеризуется сезонным обводнением пород с вертикальным движением инфильтрационных вод глубиной от нескольких метров в долине до десятков метров на склонах и в зоне постоянного водонасыщения трещинно-напорными водами долины и трещинно-жилы-

ми водами тектонических нарушений в кристаллических породах. Питание водоносных комплексов происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков. Режим подземных вод тесно связан с климатическими факторами.

Мониторинг подземных вод на месторождении «Апатитовый Цирк» осуществляется в пределах отвода Расвумчоррского рудника.

Контроль геодинамического режима в данном районе обеспечивается сейсмическим методом с ноября 2001 г. АСКСМ способна регистрировать сейсмические явления с энергией в диапазоне $1E+02$ - $1E+09$ Дж, и точностью определения координат гипоцентра до нескольких метров. За время регистрации потока сейсмической эмиссии в Хибинском массиве установлено, что сейсмический режим района производственной деятельности АО «Апатит» не стационарен. На сейсмическую реакцию массива влияют не только его геологическое и структурно-тектоническое строение, технологии разработки месторождений, темпы ведения горных работ, количество одновременно взрывааемой массы взрывчатых веществ, а также гидрогеологический режим массива [1, 3, 4, 5]. Наличие разномасштабной трещиноватости обуславливает насыщение жидкостью горных пород. В зависимости от пористости и влагопроницаемости пород, слагающих отрабатываемое месторождение, сейсмическая реакция массива может быть различной.

Сильные сейсмические события с энергией $1E+06$ Дж и более могут приводить к катастрофическим последствиям: осыпанию породы с бортов карьера, обрушению кровли выработок на подземных рудниках и т.д. Статистически выявлено, что большее число таких случаев проявления горного давления в виде толчков и техногенных землетрясений происходит

в периоды сезонной обводненности массива [1, 2, 3, 4, 5].

Определение критического уровня значений по водопритокам

Проведен анализ базы данных значений по водопритокам на рудоспусках Центрального рудника за период с 2004 г. по 2013 г., который позволил выявить фоновый уровень обводненности по каждому году (табл. 1).

Из массива данных по сейсмичности были выбраны естественные события с энергией $1.0E+06$ Дж и более и проанализированы причины их появления: как техногенные факторы (произведенный массовый взрыв), так и природные (обводненность горных пород). По результатам анализа были определены сейсмические события, появлению которых предшествовало интенсивное снеготаяние (весенний период анализа данных) или длительные/обильные атмосферные осадки.

В ходе статистического анализа данных был определен критический уровень значений по водопритоку (табл. 2) за временной диапазон «предыстории» замеров. Данный диапазон «предыстории» равен семи дням, в этот период времени отмечалась активизация сейсмической активности в виде возникновения события с энергией $1.0E+07$ Дж и более или серии (три и более) событий с энергией $1.0E+06$ Дж [2].

Определение критического диапазона значений угла спада высот снежного покрова для сейсмических событий с энергией $1.0E+06$ Дж и более

Обработан массив сейсмических данных за весенний период (май, июнь) с 2004 по 2014 гг., выбраны естественные сейсмические события с $E \geq 1.0E+06$ Дж, при этом обращалось внимание на полную сейсмическую

Таблица 1

Значения фонового уровня обводненности ($m^3/час$)

Год	Р/С № 4	Р/С № 5	Р/С № 6
2004	3	7	2
2005	7	9	3
2006	4	6	3
2007	5	6	5
2008	6	3	3
2009	6	3	3
2010	3	3	3
2011	3	3	3
2012	4	3	3
2013	5	4	2

Таблица 2

Критический уровень значений по водопритоку ($m^3/час$) за временной диапазон «предыстории» замеров

Весенний период			Осенний период		
Р/С № 4	Р/С № 5	Р/С № 6	Р/С № 4	Р/С № 5	Р/С № 6
48	61	29	88	89	34

картину до сильного события (количество и выделенная суммарная и максимальная энергия событий, зарегистрированных на исследуемом участке), исключены события или серия событий, которые были зарегистрированы после произведенного массового взрыва.

В работе использованы результаты наблюдений за изменением высоты снежного покрова, проводимые центром лавинной безопасности на горно-лавинной станции «Центральная».

При анализе оценивалось изменение данных по высоте снежного покрова и число совпадений проявления активизации сейсмической активности в данном районе. Так, на интервале времени, где отмечается спад значений высоты снежного покрова, наблюдается увеличение количества сейсмических событий с энергией от $1.0E+06$ Дж до $1.0E+09$ Дж.

Угол наклона (спада) – это изменение значений высот снежного покрова за сутки:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\Delta h}{\Delta t}\right),$$

где Δh – изменение высоты снежного покрова, – время (сутки).

Ретроспективно из базы данных выбраны события с энергией от $1.0E+06$ Дж и более. Диапазоны углов спада высоты снежного покрова разбиты условно, для каждого диапазона углов спада определено среднее ожидаемое время (в днях) возникновения сейсмических событий с энергией от $1.0E+06$ Дж

и более. Ожидаемое время тревоги (возможное возникновение событий с энергией от $1.0E+06$ Дж и более) определяется как максимальное число попаданий событий в указанный диапазон углов спада высоты снежного покрова с даты начала снеготаяния до даты зарегистрированного сейсмического события, ограниченный недельным интервалом.

Таким образом, в результате ретроспективного анализа данных сейсмических и метеорологических наблюдений были определены критические диапазоны значений углов спада высоты снежного покрова (табл. 3 левый столбец), после превышения которых наблюдается всплеск сейсмичности в виде сейсмического события ($E \geq 1.0E+07$ Дж) или серии событий ($E \geq 1.0E+06 \div 9.9E+06$ Дж).

Временные периоды возможного возникновения сильных сейсмических событий были выявлены на основании статистического анализа базы данных по количеству попаданий зарегистрированных событий за интервал времени в определенный диапазон значений углов спада высоты снежного покрова (рис. 1, результаты отражены в табл. 3 правый столбец).

Результаты ретроспективного анализа

По данным комплексного анализа метео-, гидро- и сейсмоданных за период с 2004 г. по 2014 г. были получены аналогичные результаты, кото-

Таблица 3

Критический диапазон значений угла спада высоты снежного покрова и временной интервал тревоги

Диапазоны значений углов спада высоты снежного покрова	Временной интервал тревоги
60–70	в течение 7 дней
70–80	в течение 5 дней
80–85	в течение 4 дней
85–90	в течение 2 дней

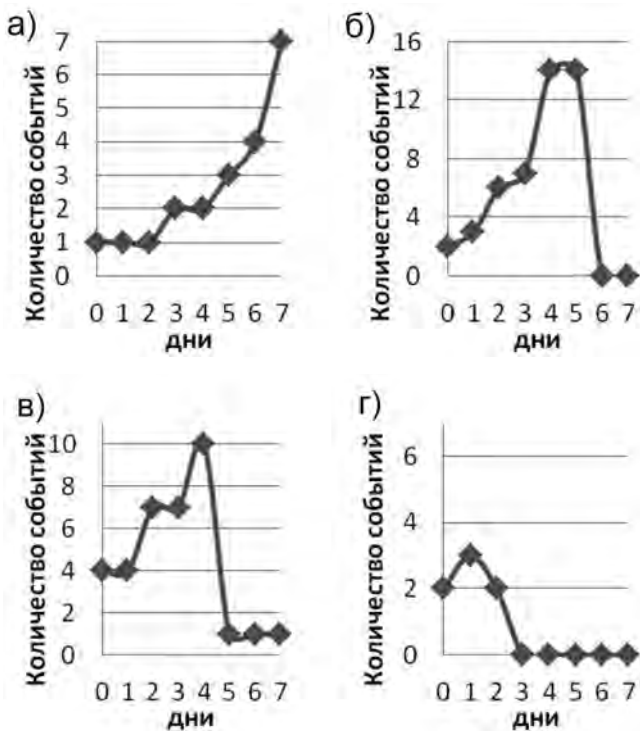


Рис. 1. Определение временных периодов возможного возникновения сильных сейсмических событий, где диапазоны значений углов спада высоты снежного покрова составляют: а) 60–70, б) 70–80, в) 80–85, г) 85–90

рые подтверждают тенденцию активизации сейсмической активности после увеличения обводненности в исследуемом районе.

Из 50 случаев наблюдений в 46 из них при превышении определенного диапазона значений угла наклона высоты снежного покрова сопровождались повышением сейсмической активности (в эти периоды были зарегистрированы сейсмические события с $E \geq 1.0E+06$ Дж). При комплексном анализе не спрогнозированные четыре события попали в интервал тревоги по возможному росту сейсмоактивности, которому предшествовало превышение критического уровня значений по водопритокам за временной диапазон «предыстории».

Таким образом, связь увеличения сезонной сейсмической активности с ростом обводненности пород послужила основой для разработки методических принципов оценки влияния метео- и гидрогеологических факторов на проявление периодов активизации сейсмической активности на рудниках АО «Апатит».

Методические принципы оценки метео- и гидрогеологических факторов для выявления периодов роста сейсмической активности:

1. Принцип определения периодов роста сейсмической активности по суммарному водопритоку за интервал «предыстории», поступающему в выработки подземного рудника. Данный принцип основан на контроле изменения значений по количеству атмосферных вод, поступающих с поверхности вглубь массива пород.

2. Принцип определения периодов роста сейсмической активности по углу спада высоты снежного покрова (весенний период). Данный принцип основан на контроле превышения определенного диапазона значений углов наклона по данным высот снежного покрова.

Применение указанных принципов позволяет на практике провести оперативный сравнительный анализ влияния определенных факторов опасности, как по отдельности, так и в совокупности.

Программная система комплексной оценки данных метео-, гидро- и сейсмомониторинга

На основе совместного анализа баз данных зарегистрированных сейсмиче-



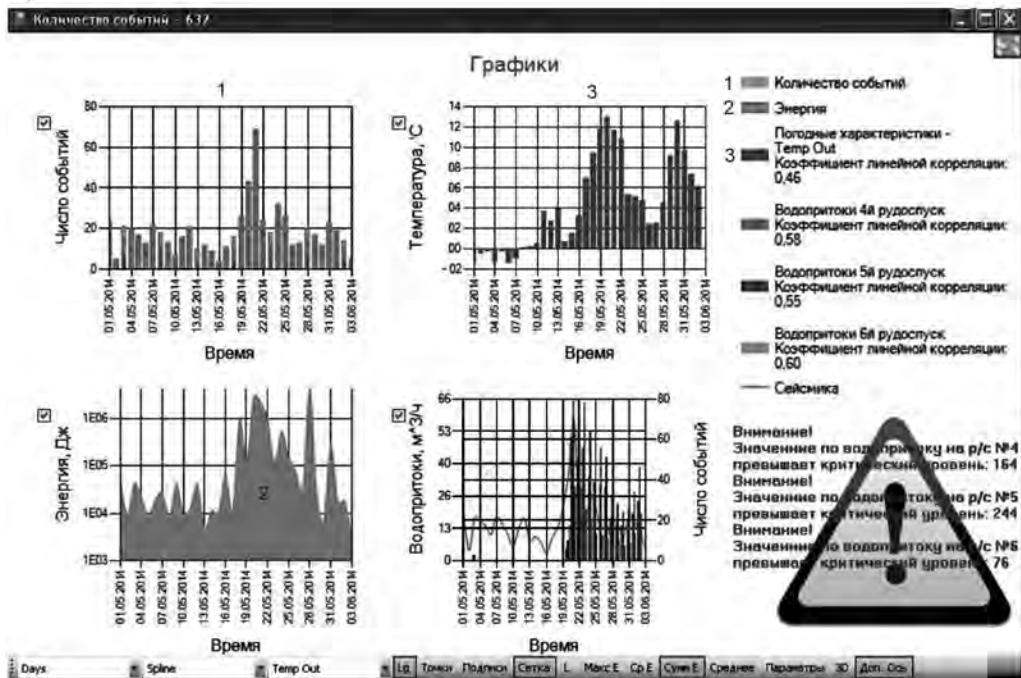
Рис. 2. Общая схема комплексной оценки данных метео- и гидрогеологического мониторинга для выявления периодов сейсмической активности на рудниках АО «Апатит» (а); блок-схема работы программной системы «SSAIS» (б)

ских событий и данных метео- и гидрогеологических наблюдений, а также выявленных критических значений по водопритокам и критических диапазонов значений углов спада высоты снежного покрова осуществляется оценка возможного усиления сейсмоактивности района обрабатываемых месторождений.

На рис. 2 представлены общая схема комплексной оценки влияния метео- и гидрогеологических факторов для установления периодов сейсмической активности на рудниках АО «Апатит» (рис. 2, а) и блок-схема работы программной системы «Seasonal seismic activity Identification System» (AS SSAIS) (рис. 2, б).

На рис. 3 приведен результат комплексного анализа данных оценки влияния метео- и гидрогеологических факторов для установления периодов активизации сейсмической активности и программной системы (ПС) «SSAIS» на май 2014 г. На рис. 3, а приведено окно ПС с результатами оценки данных сейсмических, метео- и гидрогеологических наблюдений, в котором можно видеть, что за несколько дней до серии событий программа сообщает о превышении критического уровня значений по водопритокам. На рис. 3, б представлены результаты оценки возможного возникновения роста сейсмической активности по

а)



б)

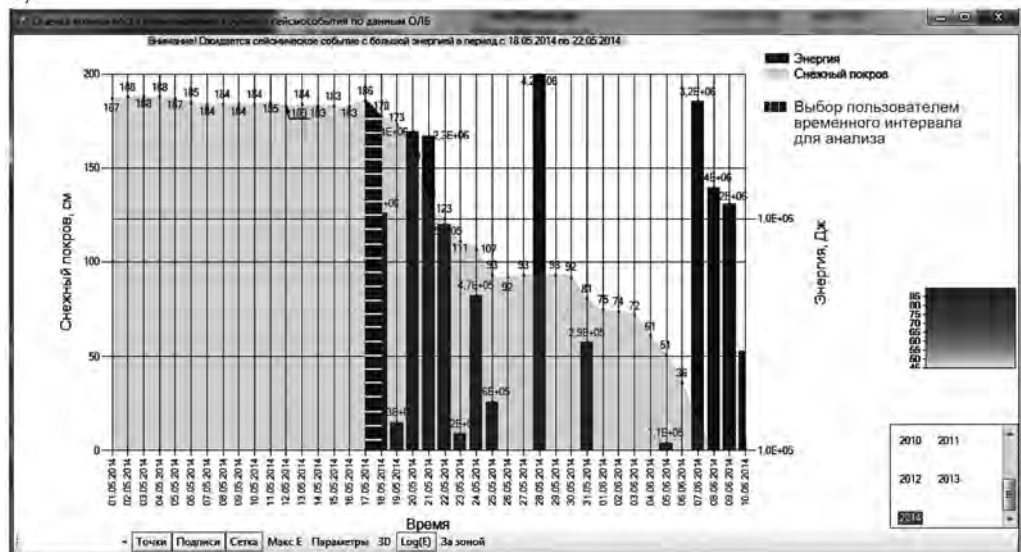


Рис. 3. Результаты оценки возможного возникновения роста сейсмичности: а) по превышению пороговых значений по водопритокам, б) по превышению критического диапазона значений углов спада высоты снежного покрова (данные отдела лавинной безопасности - ОЛБ)

изменению угла спада высоты снежного покрова для мая 2014 г. Таким образом, перспективно была успешно спрогнозирована серия событий с $E \geq 1.0E+06$ Дж.

Выводы

В ходе исследований по оценке влияния увеличения обводненности горных пород на рост сейсмической активности обрабатываемых месторождений Хибинского массива получены следующие основные результаты:

1. Определены критические диапазоны значений углов спада высоты снежного покрова и критические значения по водопритокам для весеннего и осеннего периодов, после превышения которых наблюдается всплеск сейсмичности в виде сильно-

го сейсмического события или серии событий.

2. Разработаны «Методические принципы оценки влияния метео- и гидрогеологических факторов», позволяющие выявлять причины, опасные периоды и зоны обводненных пород в массиве во время продолжительных дождей и интенсивного снеготаяния, что свидетельствует о необходимости разработки защитных мероприятий для конкретных опасных зон с учетом фактического состояния массива.

3. Разработана программная система комплексной оценки данных метео-, гидрогеологических и сейсмических наблюдений, позволяющая автоматизировать анализ данных, уменьшить временные и ресурсные затраты на их обработку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жукова С.А. Влияние обводненности пород на сейсмичность месторождения апатит-нефелиновых руд / Добыча и переработка руд в условиях ухудшения их залегания и снижения качества: Тез. докл. научной школы молодых ученых и специалистов. – Апатиты: Горный институт КНЦ РАН, 2009. – С. 10–12.

2. Жукова С.А., Самсонов А.В. Оценка влияния природных факторов на проявление сейсмичности Хибинского массива // Горный журнал. – 2014. – № 10 (2207). – С. 47–51.

3. Козырев А.А., Аккуратов М.В., Федотова Ю.В., Жукова С.А. Влияние обводненности пород на сейсмичность / Комплексные геолого-геофизические модели древних шитов. Труды Всероссийской (с международ-

ным участием) научной конференции. г. Апатиты, 28–30 сентября 2009 г. – Апатиты: Геологический институт КНЦ РАН, 2009. – С. 243–247.

4. Федотова Ю.В., Жукова С.А. Влияние природных факторов на проявления техногенной сейсмичности / Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных, Материалы шестой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 340–343.

5. Fedotova Y., Kozyrev A., Akkuratov M., Zhukova S. Rock mass watering impact on induced seismicity in junction zone between underground mine and open-pit mine // Abstract book ESC 2010, 6–10 September 2010, Montpellier, France, p. 157. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, зав. лабораторией, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,

Горный институт Кольского научного центра РАН,

Жукова Светлана Александровна – ведущий инженер-геофизик,

e-mail: SZhukova@phosagro.ru, Центр геофизического мониторинга АО «Апатит»,

Самсонов Антон Владимирович – инженер-геофизик, e-mail: ASamsonov@phosagro.ru,

Волков Александр Валерьевич – начальник Отдела лавинной безопасности АО «Апатит»,

e-mail: AvVolkov@phosagro.ru, Центр геофизического мониторинга АО «Апатит».

**METHODICAL PRINCIPLES OF NATURAL FACTORS RECORDING
WHEN ESTIMATING MINING-INDUCED SEISMICITY
AT THE Khibiny ROCK MASSIF**

Kozyrev A.A., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Deputy Director on Scientific Work, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,
Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia,
Zhukova S.A.¹, Leading Engineer Geophysicist, e-mail: SZhukova@phosagro.ru,
Samsonov A.V.¹, Engineer Geophysicist, e-mail: ASamsonov@phosagro.ru,
Volkov A.V., Head of Avalanche Safety Department, Apatit JSC, Kirovsk, Russia,
e-mail: AvVolkov@phosagro.ru,
¹ Geophysical Monitoring Center, Apatit JSC, Kirovsk, Russia, Kirovsk, Russia.

The studies have been carried out on assessment of natural factors impact on seismic activity increase at the developed Khibiny rock mass deposits. The critical values of water inflow have been determined as well as ranges of decline angles values of snow cover height. Increase of seismicity at the parts of the Khibiny rock massif is observed when exceeding these values. «The methodical principles on estimation of meteorological and hydrogeological factors impact» have been developed which allow revealing causes, hazardous periods and zones of impact of watered rocks in the rock mass during permanent raining and intensive snow melting. This will allow designing protective measures for specific hazardous zones with taking into consideration actual rock mass state.

Key words: seismic activity, monitoring, watering, mining-induced earthquake, water inflow, snow melting.

REFERENCES

1. Zhukova S.A. *Dobycha i pererabotka rud v usloviyakh ukhudsheniya ikh zaleganiya i snizheniya kachestva: Tezisy докладов научной школы молодых ученых и специалистов (Ore mining and processing in the worse occurrence conditions and quality degradation. Head-notes of papers of the school of young scientists and specialists)*, Apatity, Gornyi institut KNTs RAN, 2009, pp. 10–12.
2. Zhukova S.A., Samsonov A.V. *Gornyi zhurnal*, 2014, no 10 (2207), pp. 47–51.
3. Kozyrev A.A., Akkuratov M.V., Fedotova Yu.V., Zhukova S.A. *Kompleksnye geologo-geofizicheskie modeli drevnikh shchitov. Trudy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchnoi konferentsii*, g. Apatity, 28–30 sentyabrya 2009 g. (Integrated geological-geophysical models of ancient shields. Proceedings of All-Russia conference in partnership with the foreign scientists, Apatity, 28–30 September 2009), Apatity, Geologicheskii institut KNTs RAN, 2009, pp. 243–247.
4. Fedotova Yu.V., Zhukova S.A. *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh daniykh, Materialy shestoi Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly (Advanced methods of seismology data processing and interpretation. VI International Seismology School Proceedings)*, Obninsk, GS RAN, 2011, pp. 340–343.
5. Fedotova Y., Kozyrev A., Akkuratov M., Zhukova S. Rock mass watering impact on induced seismicity in junction zone between underground mine and open-pit min. *Abstract book ESC 2010*, 6–10 September 2010, Montpellier, France, p. 157.



«Горная Книга» выпускает издания для успешных инженеров.