

УДК 622.235:622.8

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИМ ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА И ПРОГНОЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УДАРОПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*



С. Д. ВИКТОРОВ,
заместитель директора
по научной работе,
проф., д-р техн. наук



В. М. ЗАКАЛИНСКИЙ,
ведущий научный
сотрудник,
д-р техн. наук



А. А. ОСОКИН,
старший научный
сотрудник,
канд. техн. наук,
osokin_alex-r@mail.ru

Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых чаще всего связана с необходимостью предварительного разупрочнения горных пород. Наиболее технологичным и наименее затратным в настоящее время является взрывной способ, позволяющий обеспечить необходимую интенсивность и нужный набор средств воздействия на породный массив. Совершенствование методов управления действием взрыва в пределах системы «ВВ (взрывчатое вещество) – конструкция заряда – горная порода – технология» базируется на новых идеях и подходах в исследуемой области [1, 2].

Ускоренное развитие топливно-энергетического комплекса России в современных условиях порождает ряд технических, социально-экономических и экологических проблем, требующих научно обоснованного решения. Одна из них – это обеспечение безопасности при комбинированной разработке угольных месторождений, склонных к внезапным выбросам угля и газа, а также рудных удароопасных месторождений. Проблема заключается в негативном воздействии массовых взрывов в карьере на подземные горные выработки, расположенные непосредственно под его дном.

Несмотря на известные научные и практические достижения в рассматриваемой области, сложность указанной проблемы предопределяет необходимость дальнейшего поиска сейсмотехнических методов управления внутрикарьерными взрывами. В связи с этим был выполнен комплекс исследований по оценке результатов динамического (взрывного и ударного) воздействия на горные

Предложены и испытаны конструкции скважинных зарядов с пониженным сейсмическим эффектом при ведении открытых и подземных работ в одной вертикальной плоскости. Изучены закономерности образования субмикронных частиц при квазистатическом одноосном сжатии и динамическом ударном воздействии на горные породы различных типов. Обоснована возможность использования явления дезинтеграции породы на субмикронном уровне под действием внешних нагрузок для разработки метода регистрации и прогноза динамических форм проявления горного давления в виде горных ударов.

Ключевые слова: горные породы, взрывное разрушение, сейсмическое действие взрыва, управление действием взрыва, горный удар, безопасность горных работ, эмиссия субмикронных частиц.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.19

породы, определив новый подход в решении проблемы с развитием существующей парадигмы [3].

В рамках данного подхода потребовалось решение двух задач, первая из которых представляет собой изыскание способа снижения направленного действия взрыва при комбинированной разработке месторождений в сложных горно-геологических условиях. Вторая задача в своем решении направлена на повышение безопасности разработки удароопасных месторождений на основе контроля процесса дезинтеграции породы на субмикронном уровне при динамическом воздействии на нее.

Теоретическое и экспериментальное обоснование конструкции скважинных зарядов с пониженным сейсмическим воздействием на породный массив

Для решения первой задачи нужно было рассмотреть механизм прохождения взрывной волны через предварительно разрушенный нижерасположенный участок породного массива (горную массу), чтобы оценить потери энергии волны в качественном и количественном отношении. Решить эту задачу методами теории действия взрыва в массиве не представляется возможным. Был предложен иной путь – методами численного моделирования исследовать процесс прохождения взрывной ударной волны через преграду, представленную слоями металлических плетеных сеток [4].

Проницаемые для газа пакеты сеток различной структуры были использованы для уменьшения амплитуды проходящих ударных волн. Параметры ударной волны определяли из расчета дву-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 16-17-00066).

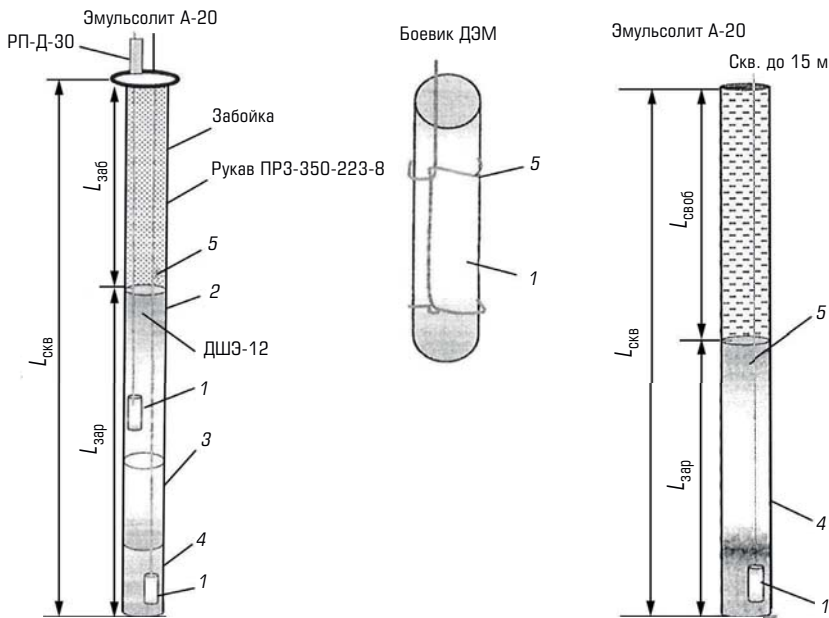


Рис. 1. Расположение элементов конструкций экспериментального (слева) и штатного (справа) скважинных зарядов:

1 – детонатор; 2 – верхний основной скважинный заряд; 3 – воздушный или инертный (древесные опилки, мелкая дробленая порода, песок и т. д.) промежуток; 4 – донный заряд; 5 – детонирующий шнур

мерной осесимметричной задачи о взрыве, поскольку форма заряда не являлась ни сферической, ни бесконечно длинной цилиндрической. В процессе решения задачи оценивали влияние проницаемой преграды и протекание процесса без нее при газодинамическом течении. Движение газа описывали по известной методике [5]. Установлено, что преграда из пакета металлических плетеных сеток реально снизила нагрузку не только по амплитуде, но и по величине импульса проходящей ударной волны. Численное моделирование позволило дать количественную оценку демпфирующих свойств преграды.

Результаты этих исследований в концептуальном аспекте были положены в основу разработки практической идеи, суть которой заключается в реализации демпфирующего эффекта во взрываемом массиве способом включения в конструкцию скважинных зарядов новых элементов. Это наглядно представлено на **рис. 1** в виде конструкции скважинного заряда, испытанной при взрывании блока на угольном разрезе «Заречный» [2].

Конструкция заряда предусматривает раздельное внутрискважинное инициирование двух рассредоточенных по массе частей взрывчатого вещества (ВВ): 10–25 % общей массы ВВ в нижней части; 75–90 % в верхней, основной части. В эксперименте в нижней части было использовано 50 кг ВВ, в верхней – 150 кг; обе части были разделены воздушным или инертным промежутком длиной 1 м. В нижней части располагается первый детонатор, который и срабатывает в первую очередь. В верхней части (основной) помещается второй детонатор, срабатывающий через определенный промежуток времени после первого. Благодаря

этому создаются условия для прохождения взрывной волны главного заряда через нижерасположенный, предварительно разрушенный участок породного массива. Заряжание обеих частей скважинного заряда может осуществляться, в принципе, как одним, так и разными взрывчатыми веществами. Таким образом, в новой конструкции заряда происходит целенаправленная разновременная детонация различных частей заряда со своими функциями. Это отличает ее от хорошо известного на практике способа взрывания рассредоточенных скважинных зарядов, когда все части заряда детонируют одновременно [6–11].

В ходе опытных взрывов по предложенной технологии на разрезе «Заречный» регистрировались сейсмические сигналы в вентиляционном штреке № 7010 нижерасположенной шахты «Талдинская-Западная-2». Установлено, что амплитуда регистрируемых сигналов в диапазоне 30–200 Гц уменьшилась не менее чем на 30 % по сравнению с контрольным взрыванием. При опытном взрывании наблюдается смещение спектра несущей частоты упругих колебаний в область низких частот до 17 % в зависимости от компоненты. Данный факт свидетельствует об эффективности образованного при опытном взрыве слоя разрушенных горных пород, который гасит распространение высокочастотной энергии основной части заряда в глубь массива.

Изменение энергии упругих колебаний, рассчитанной на основе значений виброскорости, показало снижение сейсмического воздействия на подземные выработки не менее чем на 68 %, а на поверхностные сооружения – не менее чем на 46 %.

Образование субмикронных частиц в процессах горного производства и перспективы их использования

Как известно, горное производство оказывает существенное негативное влияние на природную среду, что приводит к повышению риска возникновения катастрофических явлений на горнодобывающих предприятиях. Взрывные работы относятся к техногенным аспектам, способным спровоцировать возникновение как горного удара, так и внезапного выброса угля и газа при разработке угольных месторождений.

На сегодняшний день добыча полезных ископаемых осуществляется с помощью геотехнологий, основанных на механическом и взрывном разрушении горных пород, в результате чего создаются условия для сверхтонкого дробления горной массы и образования частиц субмикронного размера.

Выполненный в ИПКОН РАН комплекс лабораторных исследований условий образования частиц микронного и субмикронного размеров при воздействии на горные породы динамических и статических нагрузок указывает на перспективы использования данного подхода для оценки напряженно-деформированного со-

стояния породного массива и влияния сейсмического воздействия на устойчивость подземных горных выработок вблизи проведения взрывных работ. Поэтому вторая задача ориентирована на оценку и контроль изменения геомеханического состояния породного массива под влиянием нагрузок природного и техногенного характера при подземной разработке месторождений, склонных к горным ударам.

Железорудные месторождения Сибири залегают в сейсмоактивных регионах и склонны к динамическим формам проявления горного давления. Характерной особенностью этих месторождений являются большие тектонические напряжения, которые в несколько раз превышают вертикальные. Установлено изменение физико-механических свойств горных пород при их отработке на удароопасных рудниках глубиной 1 км и более. В 80–90 % принято считать, что горные удары провоцируются взрывными работами, из-за чего напряжения на отдельных участках выработок достигают своих критических значений [12]. Поэтому в рассматриваемом аспекте представляет интерес оценка сейсмозрывной составляющей среди всех нагрузок на породный массив и расположенные в нем горнотехнические объекты.

Исследования эмиссии субмикронных частиц при квазистатическом нагружении горных пород

Для изучения закономерностей разрушения горных пород на субмикронном уровне в ИПКОН РАН был создан экспериментальный стенд и проведены исследования образования субмикронных частиц при деформировании и разрушении пород различных типов. Процесс микроразрушения исследуемых образцов регистрировали посредством лазерно-спектрального анализа проб воздуха из сквозной цилиндрической полости диаметром 6 мм внутри образцов, которые подвергали квазистатическому одноосному сжатию. Регистрация субмикронных частиц осуществлялась счетчиком аэрозольных частиц Handheld 3013 в трех диапазонах их крупности: 0,3–0,5; 0,5–5 и более 5 мкм. Для исключения фоновой концентрации частиц, находящихся в воздухе помещения, где были выполнены исследования, использовался воздушный фильтр. Результаты испытаний показали, что начало процесса разрушения полости и его интенсивность существенно отличаются у разных типов пород как качественно, так и количественно (так, в некоторых породах образование частиц начинается даже при малых нагрузках). Такое различие можно объяснить различными физико-химическими свойствами, строением, анизотропией и другими характеристиками исследуемых пород. На **рис. 2** представлены результаты исследований эмиссии субмикронных частиц при квазистатическом ступенчатом одноосном сжатии, отражающие динамику образования частиц при испытаниях образца гранита. По основной оси ординат (слева) представлено количество частиц N , ед., для трех диапазонов, по дополнительной оси (справа) – одноосная ступенчатая нагрузка P , кН; по оси абсцисс – время эксперимента t , с.

Обращает на себя внимание то, что пиковые значения эмиссии частиц соответствуют времени увеличения нагрузки. Далее, в условиях статического нагружения (длительностью 60 с), на-

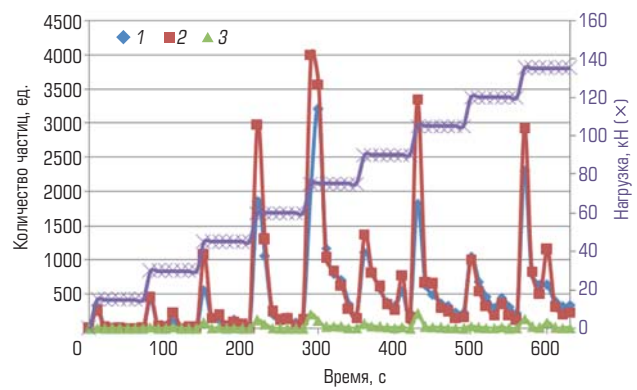


Рис. 2. Эмиссия субмикронных частиц при одноосном сжатии образца гранита крупностью, мкм:
1 – 0,3–0,5; 2 – 0,5–5; 3 – >5

блюдается спад эмиссии частиц во всех размерных диапазонах. Такое поведение можно объяснить временем, необходимым для перераспределения напряжений на контуре цилиндрической полости. Количество крупных частиц (более 5 мкм) значительно меньше по сравнению с другими размерными диапазонами (0,3–0,5 и 0,5–5 мкм), что объясняется их размером. Комплекс выполненных исследований закономерностей образования субмикронных частиц при различной скорости нагружения показал, что увеличение скорости сопровождается ростом эмиссии частиц. Таким образом, данный метод оказался весьма чувствительным к внешним нагрузкам, что позволяет идентифицировать начало процесса дезинтеграции пород и отражает ее динамику даже при воздействии небольших нагрузок.

Применительно к вопросу безопасности ведения горных работ авторы статьи выдвинули гипотезу, что динамическая нагрузка на образец имитирует действие сейсмозрывной волны на породный массив, что позволяет использовать полученные результаты для разработки метода регистрации и прогнозирования катастрофических ситуаций на горных предприятиях, в частности для рудных удароопасных месторождений, для которых характерны и опасны динамические формы проявления горного давления в виде горных ударов. На основе данной гипотезы было принято, что одномоментное динамическое воздействие на породный массив можно рассматривать как модель сейсмического воздействия на стенку горной выработки, с которой осыпаются куски породы. Новизна такого подхода была подтверждена подачей заявки на регистрацию исключительных прав на «Способ оценки влияния взрывного воздействия на напряженно-деформированное состояние массива горных пород» (№ 2016148901 от 13.12.2016 г.), заключающийся в том, что породный массив, находящийся в естественном напряженном состоянии, подвергают взрывному воздействию и одновременно с этим в шпуре или скважине, пробуренных в данном массиве, регистрируют эмиссию субмикронных частиц. По увеличению эмиссии частиц судят о более существенном влиянии взрыва на исследуемый объект.

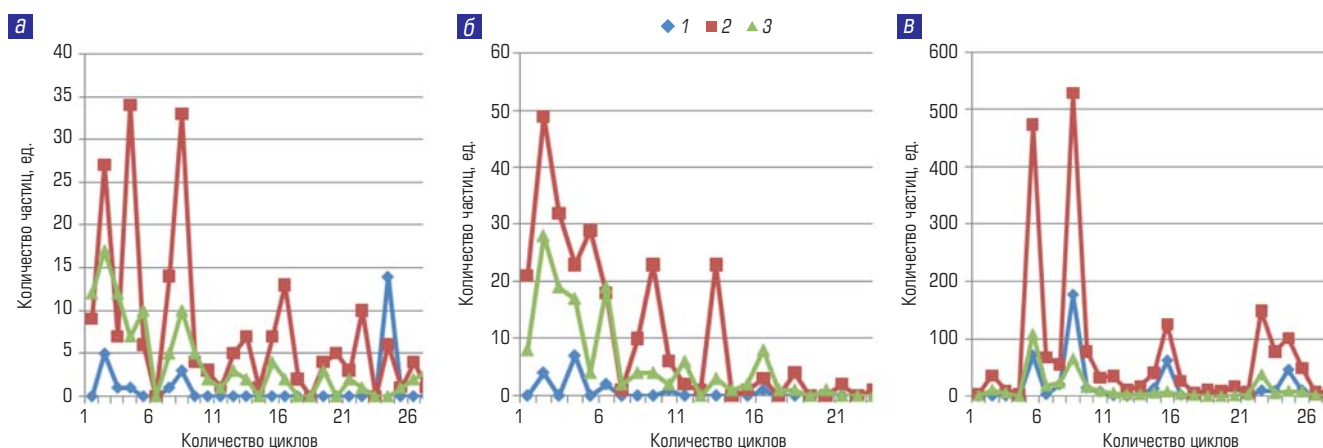


Рис. 3. Эмиссия субмикронных частиц при динамическом воздействии на образец гранита с различной потенциальной энергией E (0,11; 0,22; 0,44 Дж соответственно а, б, в) крупностью, мкм: 1 – 0,3–0,5; 2 – 0,5–5; 3 – >5

Результаты исследований образования субмикронных частиц при динамических испытаниях

Для изучения закономерностей образования субмикронных частиц с поверхности горных пород под действием динамических нагрузок были выполнены лабораторные испытания. В качестве динамического источника воздействия был использован стальной шар, величину потенциальной энергии которого меняли в зависимости от высоты его сбрасывания. На протяжении нескольких десятков циклов воздействия (числа сбросов шара) регистрировали параметры частиц в диапазоне 0,3–5 мкм и более.

Результаты динамического нагружения образца гранита для различных значений потенциальной энергии E , Дж, представлены на рис. 3. Увеличение энергии приводит к росту количества частиц во всех размерных диапазонах, оно затухает при дальнейшем воздействии при сохранении энергии постоянной. Такой спад при увеличении числа циклов динамического воздействия объясняется тем, что в первую очередь активируются дефекты, для которых энергии динамического воздействия было достаточно. После этого формируются потенциальные очаги образования новых поверхностей, которые требуют накопления большего количества энергии для образования новой поверхности, что отчетливо видно на рис. 3, в в виде двух конечных пиковых значений. Максимальное количество частиц, так же как и в случае квазистатического одноосного сжатия, представлено диапазоном 0,5–5 мкм, что можно объяснить его шириной по сравнению с диапазоном 0,3–0,5 мкм. Однако стоит отметить, что в данных испытаниях, в отличие от испытаний при одноосном сжатии, количество крупных частиц (более 5 мкм) превышает количество в диапазоне 0,3–0,5 мкм (см. рис. 2). При исследованиях условий образования субмикронных частиц при одноосном сжатии количество крупных частиц, как правило, было всегда меньше для различных типов горных пород, что объясняется размером этих частиц.

Таким образом, по интенсивности эмиссии частиц можно судить об изменении напряженно-деформированного состояния породного массива, а также о величине динамического воздействия (сейсмической волны). Чем выше степень воздействия (скорость квазистатического нагружения либо величина динамического нагружения), тем выше интенсивность образования частиц.

Исследования эмиссии субмикронных частиц при одноосном сжатии указывают на то, что резкий рост эмиссии с характерным потрескиванием образца является индикатором приближающегося его макроразрушения. Поэтому рассмотренный подход может быть использован совместно с существующими методами контроля напряженно-деформированного состояния породных массивов и краткосрочного прогноза геодинамических событий в них на основе регистрации электромагнитных сигналов, возникающих при механоэлектрических преобразованиях в горных породах [13].

Заключение

Экспериментально доказана возможность повышения безопасности комбинированной открыто-подземной разработки месторождений путем вариации величины сейсмического воздействия на породный массив. Результаты исследований процессов разрушения горных пород на субмикронном уровне представляют как научный, так и практический интерес и могут быть использованы для разработки метода регистрации и прогнозирования динамических форм проявлений горного давления при ведении подземных горных работ на удароопасных месторождениях.

Библиографический список

См. англ. блок. [ГХ](#)

«GORNYY ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 101–105
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.19

Scientific and technical aspects of control over seismic effect of blasting and prediction of dynamic events in rockburst-hazardous mining

Information about authors

S. D. Viktorov¹, Deputy Director of Scientific Work, Professor, Doctor of Engineering Sciences

V. M. Zakalinsky¹, Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences

A. A. Osokin¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, osokin_alex-r@mail.ru

¹ Academician Melnikov Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

Based on the theoretical and experimental research, the authors solve the problem connected with the aggravating effect exerted by blasting in an open pit mine on an underground mine under the pit bottom in hybrid mining operations when carried out in the same vertical plane. The problem solution is the borehole charge design having a decreased seismic effect.

The situation becomes much complicated when mining is performed under conditions of blasting-induced rockburst hazard. In this case, it is of the top priority to detect beforehand and register the initial stage of hazardous events. The article proves experimentally the usability of the rockburst hazard indicator represented by the increase in the number of submicron particles in rocks with the growth of the dynamic loading.

The studies have been supported by the Russian Science Foundation, Project No. 16-17-00066.

Keywords: rocks, explosive destruction, seismic effect of blasting, explosion control, rock burst, mining safety, emission of submicron particles.

References

1. Trubetskiy K. N., Zakharov V. N., Viktorov S. D., Zharikov I. F., Zakalinsky V. M. The explosive destruction of rocks mass in the development of mineral resources. *Problemy nedropolzovaniya*. 2014. No. 3. pp. 80–95.

- Viktorov S. D., Zakharov V. N., Zakalinsky V. M. Reduction in seismic impact of large-scale blasting in open pit mines on the stability of rocks and underground structures in hybrid coal mining. *Gornyy Zhurnal*. 2016. No. 12. pp. 59–64. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.13
- Viktorov S. D., Zakalinsky V. M., Osokin A. A. Efficient blast preparation during the mastering of layer deposits. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2015. Vol. 85, No. 2. pp. 138–145.
- Glazova E. G., Kochetkov A. V., Turygina I. A. Numerical simulation of the spatial interaction of a shock wave with a permeable barrier. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta*. 2014. No. 1(1). pp. 180–185.
- Roger Peyret, Thomas D. Taylor. *Computational Methods for Fluid Flow*. Translated from English. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 351 p.
- Louchnikov V. N., Eremenko V. A., Sandy M. P. Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs. *Eurasian Mining*. 2014. No. 1. pp. 54–62.
- Zheng Bingxu, Li Zhanjun, Liu Yi. Theory and Practice of the Fragmentation Control of Rock Blasting. *7th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. China, 2011. pp. 188–194.
- Singh P. K., Roy M. P., Amalendu Sinha. Controlled Blasting for Safe and Efficient Mining Operations at Rampura Agucha Mine in India. *8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. China, 2014. pp. 137–151.
- Haibao Yi, Haitao Yang, Li Ming, Han Bin, Zheng Lujing. Study on Open-Pit Precision Control Blasting of Easily Weathered Rock and its Application. *8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. China, 2014. pp. 157–160.
- Duan Y., Xiong D., Yao L., Wang F., Xu G. Advanced Technology for Setting Out of Blastholes and Measurements while Drilling. *11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Sydney, 2015. pp. 593–598.
- Chan Kuang Hieu. Experimental research and estimate of influence of borehole charge design on seismic intensity of large-scale blasting in open-pit coal mines in Vietnam. *Gornyy Zhurnal*. 2014. No. 9. pp. 118–120.
- Eremenko V. A. Natural and technogenic factors of rock bumps during the mining of iron ore deposits of the Eastern Siberia. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2012. No. 11. pp. 50–59.
- Eremenko A. A., Bespalko A. A., Eremenko V. A., Yavorovich L. V. Diagnostics of geophysical messengers of geodynamic phenomena and development of geotechnology of iron ore deposits mining. Novosibirsk: Nauka, 2016. 296 p.

УДК 549:574:622

РОЛЬ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РЕШЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ



Е. Г. ОЖОГИНА,
главный научный
сотрудник,
д-р геол.-минер. наук



И. В. ШАДРУНОВА,
заведующая отделом,
проф., д-р техн. наук



Т. В. ЧЕКУШИНА,
ведущий научный
сотрудник, доцент,
канд. техн. наук,
council-ras@bk.ru

Прослежено воздействие отходов горно-обогатительного производства на окружающую среду. В результате минералогических исследований выявлена возможность переработки такого рода техногенного сырья для извлечения из него полезных компонентов и сокращения тем самым площадей, занимаемых отходами.

Ключевые слова: минеральное сырье, экологические проблемы, геоэкология, минералогические исследования, отходы, загрязнение, техногенная нагрузка, технология переработки сырья, анализ, прогнозирование.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.20

Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Введение

Минеральное сырье — главный катализатор экономики любой страны. Сегодня 70–75 % мирового баланса используемого промышленного сырья — это минеральное сырье.

Добыча полезных ископаемых в мире каждые 10–15 лет удваивается, при такой интенсивности происходит значительное сокращение количества запасов в крупных горнорудных районах, ухудшение горно-геологических условий отработки месторождений, а также снижение качества руд. Сегодня минерально-сырьевая база России представлена сложными по составу и строению рудами, часто залегающими в непростых горно-геологических и ландшафтно-климатических условиях. В ближайшей