

УДК 622.831:004.94

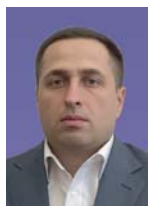
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ*



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



А. А. ОСОКИН,
старший научный
сотрудник,
канд. техн. наук



А. В. ШЛЯПИН,
старший научный сотрудник,
канд. техн. наук,
Shlyapin@mail.ru



И. Н. ЛАПИКОВ,
старший научный
сотрудник,
канд. техн. наук

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

Введение

Быстрое увеличение мировых объемов добычи минерально-го сырья в последние десятилетия привели к интенсификации подземных горных работ, оказывающих существенное воздействие на устойчивость горного массива и рост рисков возникновения катастрофических явлений. Постоянно изменяющееся напряженно-деформированное состояние (НДС) массива под воздействием техногенных и природных факторов приводит к непрерывному изменению во времени и пространстве горного массива, следствием чего является возникновение катастрофических ситуаций.

Такие явления на горнодобывающих предприятиях приводят к снижению объемов добычи, разрушению горных выработок, безвозвратной утрате дорогостоящего технического оборудования и человеческим жертвам, что существенно влияет на показатели горнодобывающей промышленности. Поэтому прогнозирование катастрофических ситуаций и мониторинг динамических явлений, особенно в сейсмоопасных горнодобывающих регионах, являются актуальными.

Представлены результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со сквозной цилиндрической полостью при одноосном сжатии, выполненного на основе разработанной авторами физической модели образования субмикронных частиц с поверхности исследуемых образцов. Определены размеры и характер изменения зон концентраций напряжений при квазистатическом одноосном нагружении образцов. Установлены пределы нагружения, позволяющие обеспечить переход образцов горных пород в состояние предразрушения. Полученные результаты необходимы для разработки принципиально нового метода и аппаратно-технической базы по регистрации динамических форм проявления горного давления и прогнозирования горных ударов при ведении подземных горных работ.

Ключевые слова: горные породы, горные удары, разрушение, деформирование, моделирование, эмиссия субмикронных частиц, концентрация напряжений.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.08

Причины возникновения катастрофических явлений и их прогнозирование

Проведенные исследования показали, что основной внешней причиной природного характера возникновения катастрофических явлений при добыче полезных ископаемых подземным способом является проявление динамической формы горного давления, повышающей риск возникновения катастрофического явления с увеличением глубины разработки месторождения. В результате преобразования потенциальной энергии внутри массива в кинетическую возникает горный удар, который сопровождается обильными выбросами руды, угля, соли и других пород, их обрушением, сильными звуковыми эффектами и образованием ударной волны. При этом происходит перераспределение горного давления, имеющее динамический характер, что является причиной возникновения катастрофического явления. В 80–90 % случаев горные удары были спровоцированы взрывными работами [1]. Также причиной возникновения горного удара является техногенное воздействие на горный массив, такое как ослабление и разрушение крепи, перемещение горного оборудования. В угольных шахтах проявление горного давления сопровождается «выдавливанием» метана из угольных пластов и резким изменением состава рудничной атмосферы, что в совокупности с разрушением технического оборудования или нарушением технологии ведения горных работ приводит к катастрофическим последствиям.

Наиболее распространенный способ прогнозирования катастрофических явлений — региональный прогноз горных ударов,

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

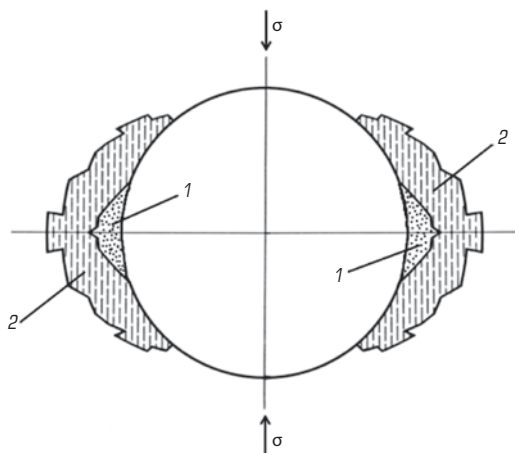


Рис. 1. Модель запредельного деформирования и разрушения поверхности цилиндрической полости при одноосном сжатии породы

который основывается на определении критической глубины залегания потенциально удароопасных пород. С его помощью удается фиксировать микроудары в напряженном массиве с энергией от 50 Дж. По длительности ударной волны оценивается энергия горного удара. Анализ частотных характеристик волны позволяет отделить непосредственно удары от технологических помех, например взрывных работ. На основе этого составляются карты сейсмической активности участков месторождения.

Также достаточно информативным является сейсмический метод, который позволяет вести непрерывный контроль изменения НДС массива в процессе ведения горных работ. С этой целью на поверхности организуют сейсмическую станцию, а в подземных горных выработках – сейсмические посты, на которых устанавливают трехкомпонентные системы датчиков сейсмических колебаний. Датчики посредством кабельных линий соединены с поверхностным контрольно-передающим пунктом шахты, откуда сигнал передается на центральную сейсмостанцию. Сейсмический метод основывается на регистрации кинетических и динамических параметров упругих сейсмических волн, возбуждаемых горными ударами и другими динамическими явлениями горного массива.

Удароопасность отдельных участков горного массива (локальный прогноз) определяют путем оценки НДС и физико-механических свойств горных пород в зоне опорного давления с применением геомеханических и геофизических методов. Существенный недостаток геомеханических методов, таких как дисконирование керна, вдавливание индентора в стенки скважин, визуальное наблюдение за разрушением выработок и др., заключается в необходимости постоянного присутствия специалиста по оценке состояния горного массива и исключает автоматизацию процесса. Недостатком геофизических методов (акустической эмиссии, электромагнитной эмиссии), основанных на зависимости энергии, амплитуды, длительности, частоты и других параметров акустических и электромагнитных колебаний от НДС и физико-

механических свойств горных пород, является их малая информативность в запредельной стадии деформирования горного массива в зоне опорного давления, где значения напряжений превышают предел прочности горных пород.

Существующие методы прогнозирования катастрофических явлений, аппаратная база и системы информационно-коммуникационного оборудования, применяемые при добыче полезных ископаемых [2–6], показали, что большинство из них направлены на регистрацию проявлений горного давления и наблюдение НДС горного массива.

Анализ мирового опыта прогнозирования катастрофических явлений на горных предприятиях [7–10], ведущих добычу минерального сырья подземным способом, показал необходимость комплексного подхода к прогнозированию катастрофических явлений на основе двух и более способов (систем) контроля НДС.

Модель разрушения горных пород

В ИПКОН РАН были проведены исследования явления отрыва фрагментов горной породы от поверхности обнажения, что происходит при высокой внутренней энергии геоматериала [11–13] и указывает на возможность образования субмикронных частиц при нагружении горных пород. В масштабе макроразрушения это явление хорошо известно как явление «стрельяния» и «шелушения» горных пород со стенок горных выработок, а в микромасштабе как фрактоэмиссия – сдвиг и отрыв микро- и наноструктурных фрагментов [14, 15].

На рис. 1 представлена разработанная В. Н. Одинцевым и В. А. Трофимовым модель запредельного деформирования и разрушения поверхности цилиндрической полости при одноосном сжатии породы, где 1 – область дезинтегрированной породы (источник свободных частиц), 2 – область частичной дезинтеграции породы [16]. Согласно этой модели, в зонах с максимальными сжимающими напряжениями геоматериал может находиться в запредельном деформировании, происходит его дезинтеграция и, как следствие, образование свободных частиц.

На основе выполненных исследований был сделан вывод о необходимости замера эмиссии частиц внутри изолированного объема в геоматериале. В качестве этого объема была выбрана сквозная цилиндрическая полость, с поверхности которой регистрировали образование субмикронных частиц.

В ходе проведения предварительных лабораторных исследований эмиссии минеральных частиц образцы доломита, уррита и известняка подвергали одноосному сжатию гидравлическим прессом PR20P. Замеры проводили в цилиндрической полости образцов счетчиком аэрозольных частиц Handheld 3013 (Light-house, USA), позволяющим определять счетную концентрацию частиц в диапазонах от 0,3 до 5 мкм с высокой точностью измерений согласно требованиям JIS В 9921. Результаты измерений представлены на рис. 2; фиксированные напряжения составляли 20, 50, 60 МПа для известняка, доломита и уррита соответственно.

Результаты исследований [17] показали, что в зонах с максимальными сжимающими напряжениями образуется система

трещин и наблюдается отрыв тонких длинных чешуек. Вследствие дезинтеграции геоматериала в этих зонах сечение полости приняло вид, близкий к форме треугольника. На **рис. 3, а** показано поперечное сечение цилиндрической полости в образце геоматериала после его нагружения. Как видно, в нижней и верхней частях контура цилиндрической полости, где действовали максимальные сжимающие напряжения, произошло его разрушение, выраженное образованием системы микротрещин, являющейся потенциальным источником возникновения свободных частиц, коротая обозначена прямоугольником и представлена в увеличенном масштабе (см. рис. 3, б).

Полученные результаты могут являться основой для разработки нового метода контроля состояния геоматериалов, подвергнутых механическому воздействию, в частности при условиях одноосного сжатия.

Результаты компьютерного моделирования зон концентрации напряжений в геоматериалах

На основе проведенных исследований выполнено компьютерное моделирование в среде ANSYS с целью установления зон концентрации напряжений, являющихся источником эмиссии субмикронных частиц, в образце железистого кварцита цилиндрической формы (высотой 50 мм и диаметром 38 мм), обладающего следующими свойствами: модуль Юнга $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; объемный модуль упругости $1,67 \cdot 10^5$ МПа; модуль сдвига $7,7 \cdot 10^4$ МПа; диаметр сквозной цилиндрической полости 6 мм. Максимальная нагрузка одноосного сжатия P составила 300 кН. Компьютерную модель образца подвергали одноосному сжатию в течение 600 с с шагом нагружения 1 с.

Нагрузка $F_{Zш}$ (величина одноосного сжатия) была определена по формуле

$$F_{Zш} = \frac{-300000}{t_{нагр}} t_{ш},$$

где $t_{ш}$ – шаг нагружения, с; $t_{нагр}$ – время нагружения, с.

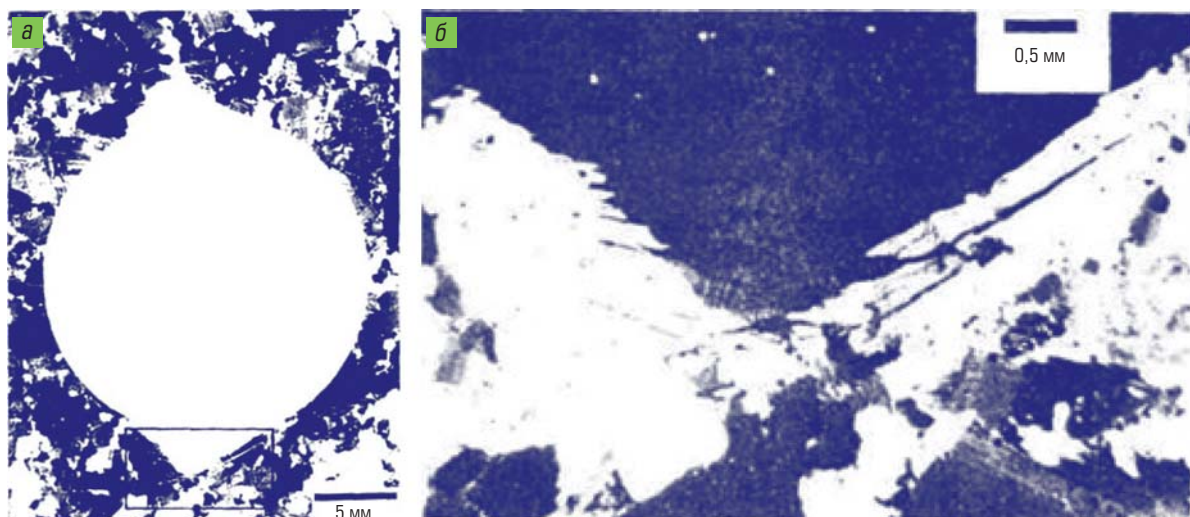


Рис. 3. Поперечное сечение цилиндрической полости после нагружения (а) и место разрушения геоматериала (б)

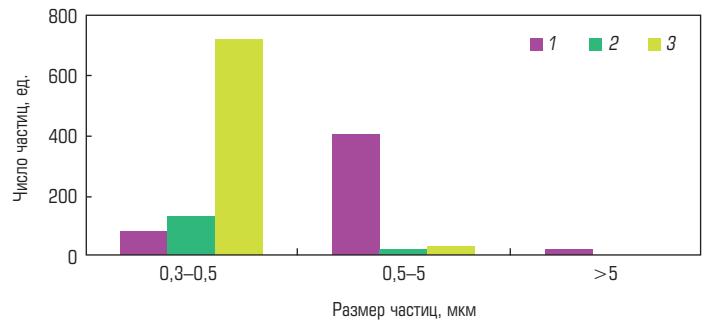


Рис. 2. Диаграмма эмиссии частиц образцов доломита (1), уртита (2) и известняка (3) при напряжении сжатия 20 МПа

На **рис. 4** представлены зоны концентрации сжимающих напряжений, значения которых достигали 570 МПа, и зоны концентрации растягивающих напряжений.

Результаты компьютерного моделирования зон деформаций образца железистого кварцита, подвергнутого одноосному сжатию, показали наличие зон дезинтеграции, которые являются потенциальными источниками эмиссии субмикронных частиц.

Концентрация напряжений в области действия максимальных напряжений сжатия, указывает на то, что дезинтеграция поверхности полости происходит раньше разрушения образца. Данный подход позволяет контролировать состояние образца и определять его критическое состояние (состояние предразрушения), индикатором которого является резкий рост эмиссии субмикронных частиц, как правило, во всех размерных диапазонах.

Заключение

Постоянно изменяющееся НДС массива, сложные горно-геологические условия добычи полезных ископаемых подземным способом и воздействие техногенных факторов приводят к непрерывному изменению во времени и пространстве горного массива. Анализ существующих методов прогноза катастрофических явле-

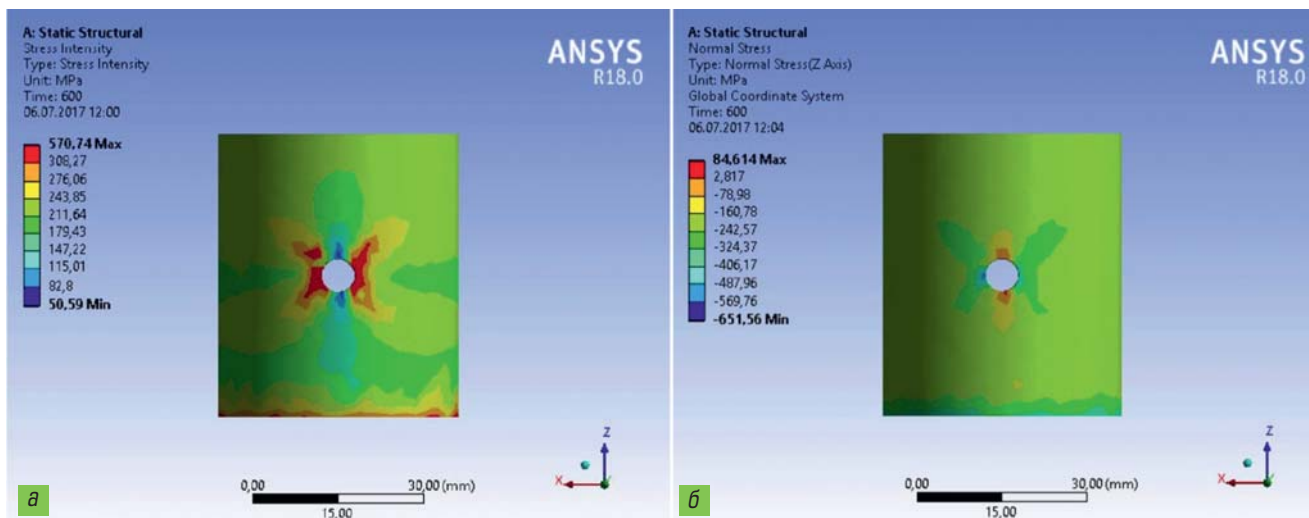


Рис. 4. Зоны концентрации сжимающих (а) и растягивающих (б) напряжений (продольный разрез)

ний на горнодобывающих предприятиях показал необходимость поиска новых методов мониторинга НДС массива горных пород для оперативного прогнозирования катастрофических явлений. Предлагаемый авторами метод позволяет регистрировать непосредственно процесс разрушения геоматериала на субмикронном уровне в запредельной стадии деформирования в зоне опорного давления в отличие от существующих методов локального прогноза горных ударов.

Большое количество как природных, так и техногенных факторов, влияющих на формирование катастрофического явления, обуславливают необходимость комплексного подхода к прогнозированию катастрофических событий. Установлено, что эмиссия субмикронных частиц горных пород при нагружении напрямую связана с состоянием, близким к разрушению.

В результате проведенных исследований установлены новые количественные и качественные критерии состояния, предшествующего разрушению геоматериалов, что может являться основой для создания аппаратной базы, позволяющей проводить анализ состояния горного массива в реальном времени и определять его состояние, близкое к катастрофическому, путем регистрации эмиссии субмикронных частиц.

Библиографический список

См. англ. блок. [РХ](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 41–45
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.08

Computer modeling of stress concentration zones for estimation of state of geomaterials

Information about authors

S. D. Viktorov¹, Deputy Director of Scientific Work, Doctor of Engineering Sciences
A. A. Osokin¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences
A. V. Shlyapin¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, shlyapin@mail.ru
I. N. Lapikov¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

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

Abstract

Study of formation conditions of micron and submicron particles on exposed rock surfaces under the action of external loads is of significant scientific and practical interest. Deformation and destruction of rock mass during mining activities, under influence of rock pressure or blasting is characterized by the initiation and growth of structural defects of different scales. To this end, the authors propose the design of rock samples for experimental studies into disintegration and formation of free particles. The article presents the results of the computer modeling of stress–strain state of rock samples with a through cylindrical cavity under uniaxial compression based on the physical model of formation of submicron particles on the sample surface developed by the authors. The size and the nature of change in the zones of stress concentration under quasi-static uniaxial loading of the samples are determined. The loading ranges within which

the rock samples transit to the pre-failure state are found. The results obtained are necessary for the development of a fundamentally new method and hardware support for registering dynamic events of rock pressure and to predict rock bursts in underground mines.

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

Keywords: rocks, rock bumps, fracture, deformation, modeling, emission of submicron particles, stress concentration.

References

- Eremenko V. A. Natural and technogenic factors of rock bumps formation during iron ore deposits mining in the Western Siberia. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2012. No. 11. pp. 50–59.
- Bobryakov A. P., Kramarenko V. I., Revuzhenko A. F., Shemyakin E. I. About the strain bursting. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1980. No. 5. pp. 3–12.
- Methods and systems of seismic–deformation monitoring of technogenic earthquakes and rock bumps : in two volumes. Resp. ed.: N. N. Melnikov. Novosibirsk : Izdatelstvo SO RAN, 2009. Vol. 1. 304 p.
- Instruction notes for creation of rock massif state control systems and forecast of rock bumps as the elements of multifunctional system of safety of coal layers. Saint Petersburg : OAO “VNIMI”, 2012. 83 p.
- Panin V. I. Investigation of regularities of stress fields redistribution during the mining of deep horizons of underground mines of the JSC “Apatit” and development of the expert systems of the choice of technical solutions for increasing the safety and efficiency of mining : final report of the agreement No. 2 6107. Apatity: Gornyy institut KNTs RAN, 2012. 30 p.

6. Durove Zh. V., Khizh Zh. Prognosis and effective prevention of rock bursts in underground coal mines in Slovakia. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012. Vol. 198. pp. 166–172.
7. Lacidogna G., Carpinteri A., Manuella A., Durin G. Acoustic and Electromagnetic Emissions as Precursor Phenomena in Failure Processes. *International Journal for Experimental Mechanics*. 2011. Vol. 47. pp. 144–152.
8. Aker E., Kühn D., Vavryčuk V., Soldal M., Oye V. Experimental investigation of acoustic emissions and their moment tensors in rock during failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 70. pp. 286–295.
9. Kabwe E., Wang Y. Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 2015. Vol. 5. pp. 104–121.
10. Kaiser P. K., Cai M. Design of rock support system under rockburst condition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012. Vol. 4(3). pp. 215–227.
11. Viktorov S. D., Kochanov A. N. Evaluation of conditions of formation and size of microparticles with devastating impacts on rock samples. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. Vol. 18, Iss. 4. pp. 1685–1686.
12. Viktorov S. D., Kochanov A. N., Odintsev V. N., Osokin A. A. Emission of submicron particles upon rock deformation. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2012. Vol. 76. pp. 388–390.
13. Kudryashov V. V., Viktorov S. D., Kochanov A. N. On particle size distribution in rocks under failure. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2006. No. 6. pp. 68–72.
14. Odintsev V. N. Detachable fragmentation of rocks. Moscow: IPKON RAN, 1996. 166 p.
15. Massalimov I. A., Urakaev F. Kh. Possibility of formation of nanosized particles in the fissure sock. *Physicochemistry of ultradispersed (nano) systems: collection of proceedings*. Moscow: MIFI, 2002. pp. 46–47.
16. Kuznetsov S. V., Odintsev V. N., Slonim M. E., Trofimov V. A. Methodology of calculation of rock pressure. Moscow: Nauka, 1981. 104 p.
17. Lee M., Haimson B. Laboratory Study of Borehole Breakouts in Lac du Bonnet Granite: a Case of Extensive Failure Mechanism. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. 1993. Vol. 30, Iss. 7. pp. 1039–1045.

УДК 622.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СОСТАВА КИМБЕРЛИТОВЫХ РУД И МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ*



Г. П. ДВОЙЧЕНКОВА,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук,
dvoigp@mail.ru,
ИПКОН РАН,
Москва, Россия



О. Е. КОВАЛЬЧУК,
главный инженер,
Научно-исследовательское
геологоразведочное
предприятие АК «АЛРОСА»
(ПАО), Мирный, Россия



Ю. А. ПОДКАМЕННЫЙ,
инженер



А. С. ТИМОФЕЕВ,
младший научный сотрудник

Методами электронной микроскопии, ИК-спектроскопии диагностированы минеральные компоненты в составе исходных кимберлитов и на поверхности алмазов. Установлены механизм и последовательность формирования минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов. Впервые выполнена их систематизация и классификация.

Ключевые слова: алмаз, кимберлит, минеральные образования, спектроскопия, модифицирование, шламы, примеси.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.09

Введение

Высокое содержание алмазов крупностью –5 мм в кимберлитовых рудах Западной Якутии обуславливает необходимую глубину их переработки по классу 0,5 мм и менее [1–3]. Извлечение алмазов данного класса крупности осуществляется процессами липкостной и пенной сепарации, а также пленочной флотации, при которых используются природные гидрофобные свойства извлекаемых кристаллов и предъявляются в соответствии с этим повышенные требования к чистоте их поверхности.

Опытом работы обогатительных фабрик и результатами исследований ряда авторов установлено, что высокая степень измененности кимберлитов, связанная с содержанием до 90 % вторичных минералов, приводит к снижению до 40 % извлечения из них алмазов процессами липкостной и пенной сепарации. При этом из кимберлитов с низкой степенью метаморфизма и содержанием вторичных минералов менее 50 % извлечение алмазов

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

* Работа выполнена в рамках плана НИР ИПКОН РАН № 0138-2014-0002 при поддержке научной школы НШ 74820145 под руководством академика РАН В. А. Чантурия.