

Типология рубинов и их промышленное значение

Н.Г. Барнов¹✉, В.В. Щипцов^{2,3}

¹ Горный институт НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

² Институт геологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Российская Федерация

³ Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Российская Федерация

✉ng.barnov@misis.ru

Резюме: Приведены сведения о Международной генетической классификации благородных корундов. Приложена схема размещения основных месторождений и проявлений рубиносодержащих комплексов мира: 1 – магматогенные; 2 – метаморфогенные; 3 – осадочные (остаточные древние коры химического выветривания, аллювиальные и делювиально-аллювиальные россыпи). Показано размещение рубиновых объектов, включающих наиболее крупные районы отработанных, ныне действующих и перспективных на ближайшее время месторождений рубина 36 стран мира. Описаны основные типологические особенности рубинов. Подчеркивается, что все свойства рубинов определяются их первичным коренным происхождением. В основу типологии рубинов положены принципы взаимосвязи магматизма и метаморфизма при формировании рассматриваемых групп. Охарактеризованы методы гидровзрыва и селективного дробления при обработке корундосодержащих комплексов. Отражена тенденция по расширению исследований по вовлечению коренных источников рубиносодержащих комплексов в промышленное использование. В странах с высокоразвитой горнорудной промышленностью подземная разработка является основным способом добычи драгоценных минералов.

Ключевые слова: рубин, рубиносодержащий комплекс, генетические серии, типология, методы гидровзрыва, селективное дробление

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР 210 ИГ КарНЦ РАН 121040600173-1.

Для цитирования: Барнов Н.Г., Щипцов В.В. Типология рубинов и их промышленное значение. *Горная промышленность*. 2021;(6):127–132. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-127-132.

The typology of rubies and their industrial significance

N.G. Barnov¹✉, V.V. Shchiptsov^{2,3}

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russian Federation

² Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation

³ Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

✉ng.barnov@misis.ru

Abstract: Information on the International Genetic Classification of Noble Corundum is given. The scheme of location of the main deposits and occurrences of ruby-bearing complexes of the world is attached: 1 – magmatic; 2 – metamorphogenic; 3 – sedimentary (residual ancient crusts of chemical weathering, alluvial and dealluvial-alluvial placers). The location of ruby objects is shown, including the largest areas of depleted, currently operating and promising for the near future ruby deposits in 36 countries around the world. The main typological features of rubies are described. It is emphasized that all properties of rubies are determined by their primary indigenous origin. The typology of rubies is based on the principles of the relationship between magmatism and metamorphism in the formation of the groups under consideration. Hydroblasting and selective crushing methods for mining of corundum-bearing complexes are characterised. The trend towards increased research into the commercial exploitation of the primary sources of ruby-bearing complexes is highlighted. In countries with highly developed mining industries, underground mining is the main way to extract gemstones.

Keywords: ruby, ruby-bearing complex, genetic series, typology, hydraulic blasting methods, selective crushing

Acknowledgments: This work was financially supported through Research Topic NIR 210 IG KarNTs RAN 121040600173-1.

For citation: Barnov N.G., Shchiptsov V.V. The typology of rubies and their industrial significance *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*. 2021;(6):127–132. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-127-132.

Введение

Корунд Al_2O_3 представляет собой единственную природную модификацию с корундовым мотивом упаковки атомов Al и O. Его кристаллы обладают целым рядом особенностей твердости, окраски и оттенков. Выделены две группы благородных корундов – рубин $(Al,Cr,Fe_{3+})_2O_3$ и сапфир $(Al,Fe_{3+})_2O_3$.

Происхождение благородных корундов остается актуальным по сей день [1]. К ним многие годы сохраняется практический интерес, продиктованный особенностями рынка, но благоприятные условия для спокойного роста особо ценных прозрачных кристаллов рубина и сапфира существуют весьма редко.

В современной генетической классификации месторождения благородных корундов мира выделены три серии – магматогенная, метаморфогенная и осадочная (вторичная) [2–4]. Серии подразделяются на типы и подтипы. К магматогенной серии (I тип) относятся щелочные базальты (IA подтип) и кимберлиты (IB подтип). Породы претерпели метаморфизм условий амфиболитовой, гранулитовой или эклогитовой фаций. Вторая серия метаморфогенная включает два типа (тип IIA метаморфического sensu stricto и тип IIВ метаморфогенно-метасоматический). Тип IIA имеет два подтипа: подтип II A1 и подтип II A2. Подтип II A1 представлен мафит-ультрамафитами, верлитами и гнейсами, подтип II A2 – мраморы и кальциево-силикатные породы. Тип IIВ состоит из двух подтипов: подтип II В1 и подтип II В2. Подтип II В1 включает в себя плюмазиты и метасоматиты, а подтип II В2 – метасоматизированные гнейсы, сланцы, ультрабазит-базиты шир-зон. Все эти комплексы подвержены метаморфогенно-метасоматическим процессам условий зеленосланцевой, амфиболитовой или гранулитовой фаций.

Во все времена и всеми народами рубины и сапфиры добывались и в настоящее время извлекаются главным образом из россыпей, образующихся на склонах и в долинах рек при разрушении первичных коренных месторождений и переходе корунда как минерала, чрезвычайно устойчивого к механическому и химическому воздействию, в осадочные речные, реке озерные и морские, песчано-галечные отложения, откуда он легко извлекается простым просеиванием или промыванием, что экономически весьма рентабельно. Именно эта детритовая серия является наиболее важной для добычи рубинов. К этой серии относятся два типа – тип IIIA и тип IIIB (россыпи). Тип IIIA представлен россыпными отложениями областей щелочных базальтов и кимберлитов. Тип IIIB составляют россыпи по метаморфическим комплексам.

В последние десятилетия, надо отметить, существенно изменились акценты в промышленной значимости тех или иных типов корундосодержащих месторождений и проявлений [4–7 и др.]. На повестке стоит вопрос об освоении крупных коренных месторождений, представленных корундоносными телами большой мощности.

Типология рубинов

В данной статье характеризуется группа рубинов. На приводимой схеме (рис. 1) показаны основные месторождения и проявления рубинов 36 стран всех континентов [4]. На этом рисунке помещена обобщенная аналитическая схема размещения наиболее крупных районов отработанных, ныне действующих и перспективных на ближайшее время месторождений рубина мира. Приводимая схема отражает как историческое прошлое, так и состояние на современ-

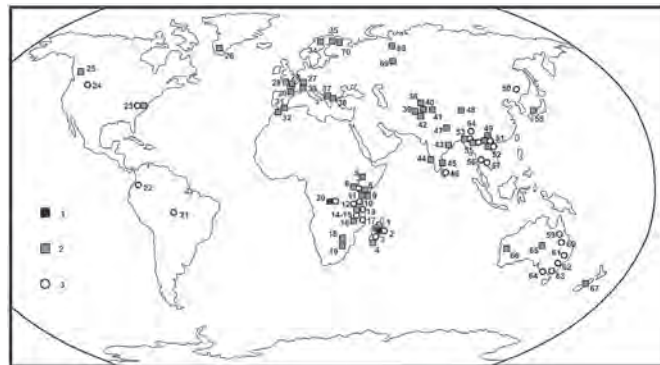


Рис. 1
Основные месторождения и проявления рубинов мира (адаптированная схема [4]):
1 – магматогенные;
2 – метаморфогенные;
3 – осадочные (остаточные древние коры химического выветривания, аллювиальные и делювиально-аллювиальные россыпи)

Fig. 1
The main deposits and occurrences of rubies in the world (adapted from [4]):
1 – magmatic;
2 – metamorphogenic;
3 – sedimentary (residual ancient chemical weathering crusts, alluvial and deluvial-alluvial placers)

ном уровне. В основу выбора объектов положены принципы полноты изучения, равной достоверности, последовательных приближений, минимальных затрат с учетом разнообразия горно-геологических условий.

Мадагаскар: (1) Andilamena, Ambodivoangy-Zahamena, Didy, Vatomandry; (2) Andriba; Ankaratra (Antisarbe-Antanifotsy район, Soamiakatra-Ambohimandroso; Ambohibary); (3) Zazafotsy; Ilakaka-Sakaraha; (4) Bekily-Vohibory территория (Ambatomena; Ianapera; Fotadrevu; Anavoha; Maniry; Gogogogo; Vohitany; Ejeda). **Эфиопия:** (5) Kibre mengist, Dilla. **Кения:** (6) West Pokot; (7) Baringo; (8) Kitui; (9) Mangare (Rockland – бывший John Saul рудник; Penny Lane; Aqua, Hard Road. **Танзания:** (10) Uмба valley; (11) Longido, Lossogonoi; (12) Winza; Loolera (Kibuko); (13) Morogoro (Mwalazi; Visakazi; Nuama, Kibuko, etc); Mahenge (Lukande; Mayote; Kitwaro; Ipanko); (14) Songea; (15) Tunduru. **Малави:** (16) Chimwadzulu. **Мозамбик:** (17) Montepuez (Namahumbire/Namahaca); M’sawize, Ruambeze. **Зимбабве:** (18) O’Brien (вердиты). **ЮАР:** (19) Barberton (вердиты). **Демократическая республика Конго:** (20) Mbuii-Mavi. **Бразилия:** (21) Sao Luis-Iuina River. **Колумбия:** (22) Mercaderes-Rio Mayo. **США:** (23) North Carolina (Corundum Hill; Cowee Valley, Buck Creek); (24) Montana (Rock Creek). **Канада:** (25) Revelstoke. **Гренландия:** (26) South of Nuuk район (Fiskenässet район – Aappalutogg); North of Nuuk (Storø; Kangerdluarssuk). **Швейцария:** (27) Campo Lungo. **Франция:** (28) Brittany (Champtoceaux); (29) French Massif Central (Haut-Allier-Chantel; Peygerolles; Losère-Aveyron-Marvejols; Vialat-du-Tarn); (30) Pyrenées (Arignac). **Испания:** (31) Alboran sea; Marracos; (32) Beni Bousera. **Италия:** (33) Piedmont. **Норвегия:** (34) Froland. **Финляндия:** (35) Kittilä. **Македония:** (36) Plilep. **Греция:** (37) Gorgona-Xanthi; Paradesti-Drama. **Таджикистан:** (38) Snezhnoe, Turakuloma, Badakhsham. **Афганистан:** (39) Jegdalek, Kash. **Пакистан:** (40) Hunza valley; (41) Batakundi, Nangimali; (42) Dir. **Индия:** (43) Orissa, Kalahandi; (44) Karnakata (Mysore); Andhra Pradesh (Salem район). **Шри Ланка:** (46) Ratnapura, Polonnaruwa; Elahera. **Непал:** (47) Chumar, Ruyil. **Китай:** (48) Oinghay; (49) Yuan Jiang; (50) Muling, **Вьетнам:** (51) Luc Yen-Yen Bai; (52) Quy Chau. **Мьянма:** (53) Mogok; (54); Namyа; (55) Mong Hsu. **Таиланд:** (56) Chanthaburi-Trat (Во

Waen, Bo Na Wong, What Tok Prom, Bo Rai, Nong Bon). **Камбоджа:** (57) Paulin, Samjant. **Япония:** (58) Ida. **Австралия:** (59) Lava Plains; (60) Anakie fields-Rubyvale; (61) New England fields (Inverell); (62) Macquarie-Cudgegong, Barrington Tops-Yurrowitch); (63) Tumarumba; (64) Western Melbourne fields; (65) Hurts range; (66) Poona. **Новая Зеландия:** (67) Westland (Hokitika). **Россия:** (68) Полярный Урал (Рай-Из); (69) Южный Урал (Ильменские Горы, Борзовская россыпь, Вишневые Горы); (70) Карелия (Хитостров)

Все свойства рубинов определяются их первичным коренным происхождением. В основу типологии рубинов положены принципы взаимосвязи магматизма и метаморфизма при формировании рассматриваемых групп.

К одному из важных типоморфных свойств относится цвет [8–10]. Красный цвет рубина связан с примесью Cr^{3+} , изоморфно замещающий Al^{3+} в алюмоокислородных октаэдрах. Оттенки цвета рубина определяются присутствием других хромоформных ионов, например, желтовато-коричневый оттенок создается примесью Fe^{3+} , а синева-фиолетовый – V^{3+} .

Рубины интенсивно люминесцируют в ультрафиолетовых и инфракрасных лучах, возбуждающих ионы хрома в кристаллической структуре минерала. При дневном или ярком электрическом освещении они приобретают ярко-красное свечение, что в определенной мере компенсирует недостаток игры света, обусловленный малой величиной дисперсии преломления.

Типохимизм рубинов магматического генезиса характеризуется минимальным содержанием хрома, который определяет красный цвет рубина. В этих образованиях с повышенным количеством в них оксидов железа, придающих рубинам нежелательный коричневый оттенок, как правило, не встречаются высококачественные рубины яркой красной или пурпуровой окраски, т.е. геохимическая обстановка не является благоприятной. Что касается метасоматических рубинов, то они отличаются повышенным содержанием хрома, влияющего на их окраску, но одновременно высокое содержание железа и титана в составе рубинов этой группы снижает их цветовые характеристики. В свою очередь, геохимическая ситуация способствует кристаллизации рубинов различной окраски.

Метаморфогенные рубины формируются в перекристаллизованных мраморах, кристаллических сланцах, кондалитах и т.п., содержащих, по сравнению с другими генетическими типами благородных корундов, в 1,5–2,0 раза больше оксида хрома, за счет которого имеют яркую красную окраску, а также максимальное по отношению к другим генетическим типам количество оксидов титана и ванадия, что обеспечивает им знаменитый «бархатный» пурпуровый цвет. Эталонные рубины Мьянмы по генезису относятся к данной группе месторождений [7].

Минералообразование происходит в твердой среде при относительно стабильном температурном и флюидном режиме, а главное, при пониженных термодинамических параметрах, что способствует росту бездефектных кондиционных кристаллов. Образование при метаморфизме преимущественно красного корунда (рубина) связывают с уменьшением его объема при вхождении хрома в структуру минерала [11].

Результаты исследования ИК-спектров отдельных микрозерен рубина в одном и том же образце варьируют, что указывает на неоднородности состава рубина. Особенно значительно отличаются друг от друга спектры прозрачных и полупрозрачных зерен. Большинство изученных об-

разцов обнаруживает ИК-поглощение в трех спектральных интервалах $4000\text{--}2500\text{ см}^{-1}$, $2200\text{--}1900\text{ см}^{-1}$ и $1500\text{--}700\text{ см}^{-1}$ (рис. 2). Последний интервал соответствует собственным колебаниям кристаллической решетки корунда. Это подтверждается тем, что в бесцветном прозрачном корунде, не содержащем видимых примесей, прослеживаются лишь линии в интервале $1500\text{--}700\text{ см}^{-1}$ (рис. 3). Интерпретация полученных спектров осуществлялась с помощью базы данных и по методике, разработанной в ЦНИГРИ [12].

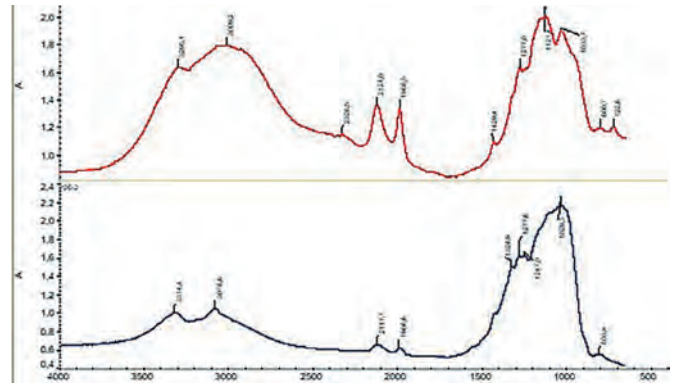


Рис. 2
ИК-спектр корунда
(обр.26/15 – светлый корунд,
Hunza, Пакистан)

Fig. 2
IR spectrum of corundum
(sample 26/15 - light
corundum, Hunza, Pakistan)

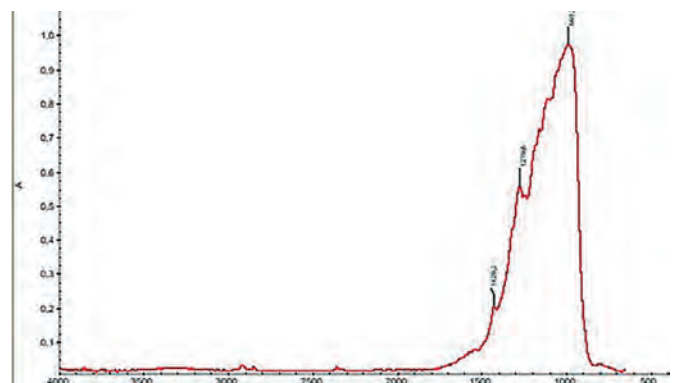


Рис. 3
ИК-спектр рубина (обр.2
месторождение Snezhnoe,
Таджикистан)

Fig. 3
Infrared spectrum of ruby
(sample 2, Snezhnoe deposit,
Tajikistan)

Изучение химического состава рубинов проводилось с использованием электронно-зондового микроанализатора JXA-8100 фирмы JEOL в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН. Изучаемая поверхность образцов полировалась и для обеспечения электропроводимости напылялась тонким слоем углерода. В результате проведенной работы были выявлены включения минералов (рис. 4, 5), представленные окислами и гидроокислами железа, цирконом, амфиболами, плагиоклазом, слюдами, хлоритом, гранатом, апатитом, диаспором, рутилом, ильменитом, каолинитом и минералами редких земель. В исследованных образцах наблюдается развитие вторичных минералов – окислов и гидроокислов алюминия. В некоторых образцах отмечаются примеси элементов-хромофоров: железо, хром, титан.

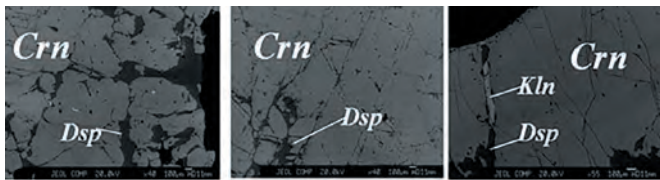


Рис. 4
Минеральные включения в рубине (обр. №44, провинция Luc Yen-Yen Bai, Вьетнам): Crn – корунд (рубин); Dsp – диаспор, Kln – каолинит

Fig. 4
Mineral inclusions in ruby (sample No.44, Luc Yen-Yen Bai province, Vietnam): Crn – corundum (ruby); Dsp – diaspore, Kln – kaolinite

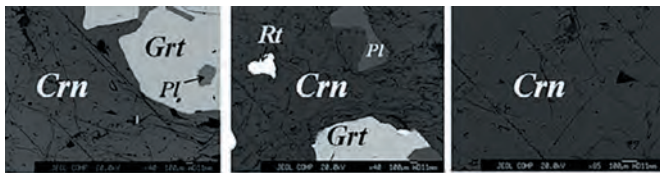


Рис. 5
Минеральные включения в рубине (обр. №14 – корунд, Jegdalek Афганистан): Crn – корунд (рубин); Grt – гранат; Pl – плагиоклаз; Rt – рутил

Fig. 5
Mineral inclusions in ruby (sample No. 14 - corundum, Jegdalek Afghanistan): Crn – corundum (ruby); Grt – garnet; Pl – plagioclase; Rt – rutile

По петрографическим характеристикам среди флюидных включений (ФВ) выделены две группы. В соответствии с критериями E. Roedder [13] первая группа ФВ отнесена к первичным, захваченным во время роста кристаллов, вторая группа отнесена к вторичным. Она содержит флюид, проникший по трещинам после кристаллизации минерала. Размер первичных включений составляет от 2 до 50 мкм, округло-вытянутые или неправильной формы, а также кристаллы отрицательные с элементами кристаллографической огранки. Размер вторичных включений не превышает 10 мкм.

Форма и размеры ФВ определялись с использованием оптического микроскопа Olimpus BX-51. Микротермометрические исследования ФВ проводились в секторе минералогии ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam» (Англия).

Для изучения выбраны первичные ФВ размером от 5 мкм. По фазовому составу при комнатной температуре все включения однофазные. При охлаждении и нагревании было обнаружено, что все ФВ содержат жидкую углекислоту.

В отдельных корундах обнаружены двухфазные ФВ – газ + жидкость. По соотношению фаз в них можно выделить 2 типа: 1 – с газовой фазой, занимающей не более 30 % объема ФВ; 2 – с газовой фазой, занимающей до 50 % объема ФВ. Флюидные включения первого типа содержат водно-солевой флюид. Флюидные включения второго типа содержат углекислотно-метановый флюид. Вероятно, что кристаллизация всех рубинов происходила в условиях гетерогенной среды из несмешиваемых слабосоленого водно-солевого и высокоплотного углекислотного флюидов. Включения первого типа встречаются цепочками и плоскостями (рис. 6, а и б, в) рядом с цепочками включений второго типа (углекислотными) (рис. 6, б), что позволяет предполагать их сингенетичность, т.е. одновременный захват [14].

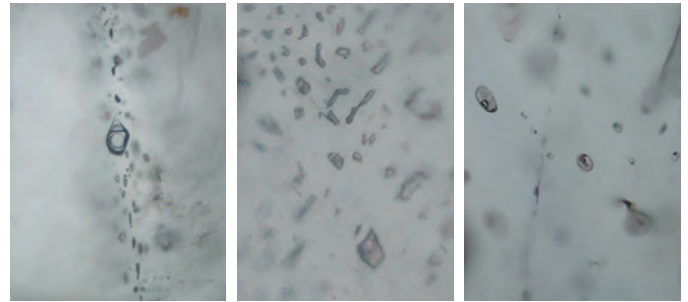


Рис. 6
Основные формы фазовых включений в рубинах

Fig. 6
The main forms of phase inclusions in rubies

Плавление углекислоты происходило в температурном интервале от –58,3 °С до –65,0 °С в первичных включениях и при –59,2 °С во вторичных. Тпл. чистой CO₂ соответствует температуре –56,6 °С.

Гомогенизация углекислоты в первичных и вторичных ФВ происходила в жидкую фазу. В первичных включениях температуры варьируют от +1,5 °С до +29,9 °С, во вторичных – от +6,1 °С до 12,1 °С. Количество примесей метана в первичных ФВ оценено в 15–16%, во вторичных – 9–10%.

Преобладающим компонентом минералообразующей системы при кристаллизации корунда была высокоплотная углекислота с небольшим количеством других газов. Давление для условного интервала температур от 200 °С до 700 °С в первичных ФВ было оценено в 1100–3600 бар, во вторичных – 700–260.

Методы гидрозрыва и селективное дробление при отработке корундосодержащих комплексов

В текущий момент приоритетным становится направление, связанное с комплексной механизацией основных технологических процессов, обеспечивающих поточность процесса очистной выемки с учетом полноты и качества извлечения руды. Во всех случаях предъявляются жесткие требования к выбору систем разработки, особенно месторождений со сложными горно-геологическими условиями [15–17 и др.].

Для решения задач по оценке состояния массива горных пород также применяется метод гидрозрыва. Он основан на принципе восстановления первоначальных напряжений в массиве горных пород и дальнейшего увеличения давления вплоть до образования в массиве трещин разрыва [18]. Каждая область применения подразумевает свою геотехнологическую основу, однако есть ряд единых принципов и подходов к прогнозированию направления развития трещин гидрозрыва.

Нашими исследованиями показано, что применение при проходке рудных штреков буро-гидрозрывной технологии позволяет значительно уменьшить показатели разубоживания и потерь руды. Это в значительной степени компенсирует снижение данных показателей при дальнейшей скважинной отбойке массива. Использование для одновременной полной механизированной закладки пустых пород и камер временного складирования позволяет минимизировать расходы на ее транспортирование, хранение и, как следствие, позволяет уменьшить экологическую нагрузку на среду обитания человека в ареале влияния горнотехнической системы.

Для сохранения рубинов в условиях применения технологии гидрозрыва при освоении коренных месторожде-

ний корунда камерно-столбовой системой разработки рассмотрены варианты проведения щадящих взрывов зарядами ВВ с эффектом декаплинга для отбойки сформированных разрывом блоков с сохранением их целостности [19].

Изучение механизма селективного разрушения горных пород базируется на актах управляемого объемного или поверхностного силового воздействия, создающего в объеме минералов различные напряженно-деформированные состояния [20; 21].

В процессе научных исследований разработана методика расчета эффективности селективного дробления, которая может быть применима при сопоставленном анализе использования различных режимов силового воздействия [22]. Доказано, что результаты селективного дробления достигаются при реализации режимов всестороннего сжатия, в том числе при сжатии «в слое». В этом отношении представлена методика расчета критерия эффективности селективного дробления горных пород при извлечении из них ценных минералов без переизмельчения. На основе компьютерного моделирования сформулирован вывод о достижении наибольшего эффекта селективной дезинтеграции при дроблении породы «в слое», что достигается

в условиях равномерного всестороннего сжатия. Выполнены лабораторные эксперименты, которые подтвердили реализацию механизма селективного дробления материнской породы мрамора с включениями рубина.

Заключение

До настоящего времени приоритет оставался за месторождениями остаточных древних кор химического выветривания рубиноносных горных пород и за известными промышленными месторождениями рубина аллювиальных и делювиально-аллювиальных россыпей, но уменьшение потенциала россыпей рубина приводит к повышенному интересу к коренным рубиноносным комплексам, развитию актуальных многоплановых исследований, включая выявление типологических особенностей магматогенных и метаморфогенных рубинов.

В странах с высокоразвитой горнорудной промышленностью подземная разработка является основным способом добычи драгоценных минералов. В настоящий период в Канаде, Австралии и ЮАР разработка месторождений практически полностью осуществляется подземным способом.

Список литературы

- Sutherland F., Zaw K. Editorial for special issue "Mineralogy and Geochemistry of Ruby". *Minerals*. 2020;10(10):888. <https://doi.org/10.3390/min10100888>
- Fagan A.J. *The ruby and pink sapphire deposits of SW Greenland: Geological setting, genesis, and exploration techniques*: Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada; 2018. <https://doi.org/10.14288/1.0372956>
- Simonet C., Fritsch E., Lasnier B. A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. *Ore Geology Reviews*. 2008;34(1–2):127–133. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.09.002>
- Giuliani G., Groat L.A., Fallick A.E., Pignatelli I., Pardieu V. Ruby deposits: A review and geological classification. *Minerals*. 2020;10(7):597. <https://doi.org/10.3390/min10070597>
- Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A.E., Groat, L., Fagan J. The geology and genesis of gem corundum deposits. In: Groat L.A. (ed.) *Geology of Gem Deposits*. 2nd ed. Tucson, AZ, USA: Mineralogical Association of Canada; 2014, vol. 2, pp. 29–112. Available at: https://www.researchgate.net/publication/271198687_The_Geology_and_Genesis_of_Gem_Corundum_Deposits
- Saul J.M. *A geologist speculates: On gemstones, origins of gas and oil, moonlike impact scars on the earth, the emergence of animals and cancer*. 2nd ed. Paris; 2015. 160 p.
- Барнов Н.Г., Мельников Е.П. Генетические типы благородных корундов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(6):79–85.
- Arem J.E. *Color encyclopedia of gemstones*. New York: Van Nostrand Reinhold Co; 1977. 149 p.
- Буканов В.В. *Цветные камни и коллекционные минералы*. СПб.: Ottava Book Printing; 2014. 464 с.
- Palke A. P. Coexisting rubies and blue sapphires from major world deposits: A brief review of their mineralogical properties. *Minerals*. 2020;10(5):472. <https://doi.org/10.3390/min10050472>
- Годовиков А.А. *Минералогия*. М.: Недра; 1983. 328 с.
- Хачатрян Г.К., Кряжев Г.К. Методика анализа породообразующих и аксессуарных минералов рудных месторождений с использованием ИК-Фурье микроскопа. *Руды и металлы*. 2010;(5):64–73.
- Roedder E. Fluid Inclusions. In: Ribbe P.H. (ed.) *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America; 1984. Vol. 12. 644 p.
- Goldstein R.H., Reynolds T.J. *Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals*. Society for Sedimentary Geology; 1994. 200 p. Available at: <http://foldtudomany.elte.hu/fluid/fluid%20inclusions.pdf>
- Rosengren K. *Avoca mining method*. Presentation at Broken Hill Zinc-lead mine, NSW, Australia; 2014. 212 p.
- Еременко В.А., Есина Е.Н., Семенякин Е.Н. Технология оперативного мониторинга напряженно-деформированного состояния разрабатываемого массива горных пород. *Горный журнал*. 2015;(8):42–47. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.08.10>
- Louchnikov V.N., Eremenko V.A., Sandy M.A. Ground Support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs. *Eurasian Mining*. 2014;(91):54–62. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1327/article/22704/>
- Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок. *Физико-химические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(4):20–28.
- Барнов Н.Г., Еременко В.А., Кондратенко А.С. Отбойка сформированных гидровзрывом блоков при ведении очистных работ зарядами ВВ с эффектом декаплинга. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(3):200–209.
- Хопунов Э.А. *Селективное разрушение минерального и техногенного сырья*. Екатеринбург: УИПШ; 2013. 429 с.
- Газалеева Г.И., Цыпин Е.Ф., Червяков С.А. *Рудоподготовка: дробление, грохочение, обогащение*. Екатеринбург: ООО «УЦАО»; 2014. 914 с.
- Барнов Н.Г., Каркашадзе Г.Г. Обоснование механизма селективной дезинтеграции горных пород с целью извлечения цельного камнесамоцветного сырья. *Горный журнал*. 2017;(1):47–49. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.01.09>

References

1. Sutherland F., Zaw K. Editorial for special issue "Mineralogy and Geochemistry of Ruby". *Minerals*. 2020;10(10):888. <https://doi.org/10.3390/min10100888>
2. Fagan A.J. *The ruby and pink sapphire deposits of SW Greenland: Geological setting, genesis, and exploration techniques*: Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada; 2018. <https://doi.org/10.14288/1.0372956>
3. Simonet C., Fritsch E., Lasnier B. A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. *Ore Geology Reviews*. 2008;34(1–2):127–133. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.09.002>
4. Giuliani G., Groat L.A., Fallick A.E., Pignatelli I., Pardieu V. Ruby deposits: A review and geological classification. *Minerals*. 2020;10(7):597. <https://doi.org/10.3390/min10070597>
5. Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A.E., Groat, L., Fagan J. The geology and genesis of gem corundum deposits. In: Groat L.A. (ed.) *Geology of Gem Deposits*. 2nd ed. Tucson, AZ, USA: Mineralogical Association of Canada; 2014, vol. 2, pp. 29–112. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/271198687> The Geology and Genesis of Gem Corundum Deposits
6. Saul J.M. *A geologist speculates: On gemstones, origins of gas and oil, moonlike impact scars on the earth, the emergence of animals and cancer*. 2nd ed. Paris; 2015. 160 p.
7. Barnov N.G., Melnikov E.P. Genetic classification of gem corundum deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015;(6):79–85. (In Russ.)
8. Arem J.E. *Color encyclopedia of gemstones*. New York: Van Nostrand Reinhold Co; 1977. 149 p.
9. Bukanov V.V. *Colored stones and collectible minerals*. St. Petersburg: Ottava Book Printing; 2014. 464 p. (In Russ.)
10. Palke A. P. Coexisting rubies and blue sapphires from major world deposits: A brief review of their mineralogical properties. *Minerals*. 2020;10(5):472. <https://doi.org/10.3390/min10050472>
11. Godovikov A.A. *Mineralogy*. Moscow: Nedra; 1983. 328 p. (In Russ.)
12. Khachatryan G.K., Kryazhev G.K. Method of analysis of rock-forming and accessory minerals of ore deposits using an IR-Fourier microscope. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2010;(5):64–73. (In Russ.)
13. Roedder E. Fluid Inclusions. In: Ribbe P.H. (ed.) *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America; 1984. Vol. 12. 644 p.
14. Goldstein R.H., Reynolds T.J. *Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals*. Society for Sedimentary Geology; 1994. 200 p. Available at: <http://foldtudomány.elte.hu/fluid/fluid%20inclusions.pdf>
15. Rosengren K. *Avoca mining method*. Presentation at Broken Hill Zinc-lead mine, NSW, Australia; 2014. 212 p.
16. Eremenko V.A., Esina E.N., Semenyakin E.N. Technology of dynamic monitoring of stresses and strains in rocks under mining. *Gornyy Zhurnal*. 2015;(8):42–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.08.10>
17. Louchnikov V.N., Eremenko V.A., Sandy M.A. Ground Support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs. *Eurasian Mining*. 2014;(91):54–62. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1327/article/22704/>
18. Kurlenya M.V., Baryshnikov V.D., Gakhova L.N. Experimental and analytical method for assessing stability of stopes. *Journal of Mining Science*. 2012;48(4):609–615. <https://doi.org/10.1134/S1062739148040028>
19. Barnov N.G., Eremenko V.A., Kondratenko A.S. Blasting of hydrofracturing-preconditioned blocks with decoupled explosive charges. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016;(3):200–209. (In Russ.)
20. Khopunov E.A. *Selective destruction of mineral and technogenic raw materials*. Ekaterinburg: UIPTs; 2013. 429 p. (In Russ.)
21. Gazaleeva G.I., Tsylin E.F., Chervyakov S.A. *Ore preparation crushing, screening, enrichment*. Ekaterinburg: UTSAO LLC; 2014. 914 p. (In Russ.)
22. Barnov N.G., Karkashadze G.G. Evaluation of selective disintegration mechanism for extraction of whole semi-precious stones. *Gornyy Zhurnal*. 2017;(1):47–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.01.09>

Информация об авторах

Барнов Николай Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Горного института, НИТУ «МИСиС», e-mail: ng.barnov@misis.ru

Щипцов Владимир Владимирович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом минерального сырья Института геологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Российская Федерация; старший научный сотрудник кафедры наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.11.2021
 Поступила после рецензирования: 29.11.2021
 Принята к публикации: 29.11.2021

Information about the authors

Nikolay G. Barnov – Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Associate Professor, Department of Physical Processes of Mining Operations and Geo-control, Mining Institute, National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russian Federation, e-mail: ng.barnov@misis.ru

Vladimir V. Shchiptsov – Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Professor, Chief Research Associate, Head of Mineral Resources Department, Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation; Senior Researcher, Department of Earth Sciences and Geotechnologies, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

Article info

Received: 08.11.2021
 Revised: 29.11.2021
 Accepted: 29.11.2021