

УДК 553.823 (470.22)

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОРУНДСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ХИТОСТРОВ (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ)

Н. Г. Барнов<sup>1</sup>, В. В. Щипцов<sup>2,3\*</sup>, Т. П. Бубнова<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Горный институт Национального исследовательского технологического университета МИСИС (Ленинский просп., 4, Москва, Россия, 119991)

<sup>2</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),  
\*v.shchiptsov@gmail.com

<sup>3</sup> Петрозаводский государственный университет (пр. Ленина, 33, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910)

Рассмотрены геологические и минералого-технологические особенности формирования палеопротерозойских корундсодержащих пород проявления Хитостров. Приведены основные периоды их формирования, среди которых выделена характеристика Карело-Кольской сапфир-рубиноносной провинции. Отмечена специфика формирования корундсодержащих комплексов в восточной части Фенноскандинавского щита. Для Кольского полуострова характерным является корундообразование в ксенолитах щелочного комплекса Хибинского массива. В Карелии корундсодержащие породы образованы в границах Беломорского подвижного пояса и выделены два их типа – в глиноземистых плагиогнейсах (первый тип) и в метабазитах (второй тип). Все корунды Беломорского подвижного пояса образованы за счет метасоматических процессов в свекофеннский период активизации. На основании геологии и минералого-технологических особенностей известного объекта делается комплексная оценка проявления корундов Хитостров как главного представителя Карело-Кольской сапфир-рубиноносной провинции. Рассмотрены способы вскрытия корундсодержащих пород и дана оценка эффективности использования оптической сепарации корундовых руд Хитострова. Полученные результаты научных исследований дополнили базу данных уникального геологического объекта и стали эталонными для оценки на корунды области Беломорского подвижного пояса.

Ключевые слова: корунд; проявление; Хитостров; свекофеннская активизация; микротвердость; оптическая сепарация

Для цитирования: Барнов Н. Г., Щипцов В. В., Бубнова Т. П. Геологическая и минералого-технологическая характеристика корундсодержащих пород на примере проявления Хитостров (Северная Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 2. С. 39–52. doi: 10.17076/geo1752

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания КарНЦ РАН, тема № 1022040400124-6-1.5.5.

# N. G. Barnov<sup>1</sup>, V. V. Shchiptsov<sup>2,3\*</sup>, T. P. Bubnova<sup>2,3</sup>. GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF CORUNDUM-BEARING ROCKS IN THE KHITOSTROV OCCURRENCE (NORTHERN KARELIA)

<sup>1</sup> Institute of Mining, National University of Science and Technology (MISiS) (4 Leninsky Ave., 119991 Moscow, Russia)

<sup>2</sup> Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*vv.shchiptsov@gmail.com

<sup>3</sup> Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

The geological and mineralogical features of the formation of Paleoproterozoic corundum-bearing rocks of the Khitostrov deposit are considered. The formation history of the corundum-bearing rocks is divided into periods and the characteristics of the Karelian-Kola sapphire-rubiferous province are highlighted. The specific features of the genesis of corundum-bearing complexes in the volcanic part of the Fennoscandinavian Shield are marked. Corundum formation in xenoliths of the alkaline complex of the Khibiny massif is typical of the Kola Peninsula. In Karelia, corundum-bearing rocks are formed within the boundaries of the Belomorian Mobile Belt and two types are distinguished – corundum-bearing rocks in aluminous plagiogneisses (first type) and corundum-bearing rocks in metabasites (second type). All corundums of the Belomorian Mobile Belt were formed due to metasomatic processes during the Svecofennian period of activation. Based on the geology and mineralogical and technological features of a known occurrence, the Khitostrov corundum occurrence is comprehensively evaluated as the main representative of the Karelian-Kola sapphire-rubiferous province. The methods for corundum-bearing rock stripping are considered and the efficiency of optical separation of Khitostrov's corundum ores is assessed. The results of this study supplement the database on this unique geological object and provide a background for the assessment of the corundum area of the Belomorian Mobile Belt.

Keywords: corundum; occurrence; Khitostrov; Svecofennian activity; microhardness; optical separation

For citation: Barnov N. G., Shchiptsov V. V., Bubnova T. P. Geological and mineralogical characteristics of corundum-bearing rocks in the Khitostrov occurrence (Northern Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 2. P. 39–52. doi: 10.17076/geo1752

Funding. The study was carried out under state assignment to KarRC RAS with theme #1022040400124-6-1.5.5.

## Введение

Изучение корундовой минерализации среди пород Беломорского подвижного пояса представляет интерес из-за большого количества до сих пор не решенных проблем происхождения и, возможно, экономического (в том числе коллекционного) значения корунда. Происхождение благородных корундов остается актуальным по сей день [Sutherland, Zaw, 2020]. К ним многие годы сохраняется практический интерес, продиктованный особенностями рынка, а благоприятные условия для спокойного роста особо ценных прозрачных кристаллов рубина и сапфира существуют весьма редко. В последние десятилетия существенно изменились акценты в промышленной значимости тех или иных типов коренных корундосодержащих месторождений и проявлений

[Giuliani et al., 2014, 2020; Барнов, Мельников, 2015; Saul, 2015 и др.].

Целью наших исследований стала аргументация процесса корундообразования в границах Беломорского подвижного пояса на примере корундового проявления Хитостров. В задачи входил анализ собственных, а также имеющихся опубликованных данных и фондовых материалов по корундам Беломорского подвижного пояса. В прикладном отношении требовалось наполнение фактическим материалом планируемой базы данных корундосодержащих комплексов указанного пояса, в котором определенное место принадлежит уникальному геологическому объекту – проявлению корундов Хитостров.

В статье также рассматриваются геологические и минералого-технологические особенности корундосодержащих пород проявления Хитостров (Северная Карелия).

## Периоды формирования промышленных корундсодержащих пород

В геодинамической истории корундсодержащих пород, включая месторождения благородных корундов (рубин и сапфир), установлено несколько периодов их формирования.

Месторождения рубинов Гренландии датируются как неогархейские (месторождение Aappaluttoq и др.) [Polat et al., 2010]. Со свекофенским циклом активизации в палеопротерозое связаны месторождения и проявления корундов в Беломорском подвижном поясе [Крылов и др., 2011].

Основным периодом формирования благородных корундов был панафриканский орогенез (750–450 млн лет назад). Именно в этот период сформированы месторождения рубинов и сапфиров в поясе драгоценных камней Восточной Африки, Индии, Шри-Ланки, Мадагаскара [Giuliani et al., 2014], связанные с коллизионными процессами между Восточной и Западной Гондваной во время панафриканских тектонико-метаморфических событий [Kroner, 1984].

Большое значение в образовании месторождений корундов отводится кайнозойскому альпийскому орогенезу, с которым связаны тектонические события в Альпах, Родобах и Гималаях, т. е. от 55 млн лет до четвертичного периода. В гималайских мраморных метаморфических блоках месторождения рубина претерпели крупные тектонические события при столкновении Индийской и Азиатской плит [Garnier et al., 2004, 2006; Litvinenko et al., 2020].

Важный период образования ювелирных корундов мира связан с экструзиями щелочных базальтов в кайнозое (от 65 млн лет до четвертичного периода). Драгоценный корунд встречается в виде ксенокристов или мегакристов, в ксенолитах или анклавах, включенных в базальтовые магмы во время их подъема. Подобные месторождения рубинов и сапфиров установлены в Тасмании, Восточной Австралии, Юго-Восточной Азии и Восточном Китае, а также на Дальнем Востоке России [Sutherland et al., 1998, 2019; Высоцкий и др., 2003].

## Краткая характеристика Карело-Кольской сапфир-рубиноносной провинции

Карело-Кольская сапфир-рубиноносная провинция размещается в восточной части Фенноскандинавского щита [Барнов и др., 2016; Барнов, Щипцов, 2021]. В пределах провинции развиты различные генетические типы благородных корундов: сапфировый –

в нефелиновых (миаскитовых) и сиенитовых пегматитах, ксенолитах щелочных пород Кольского полуострова (ущелье Ферсмана, «Рыжая незнакомка», «Кукисвумчорр», Цирконовая перемычка, Лопарский перевал и др.) и рубиновый – в глубоко метаморфизованных гнейсах и амфиболитах беломорской серии архея Карело-Кольского региона (проявления Хитостров, Перуселька, Дядина гора, Варацкое и др.) [Меньшиков, 1978; Буканов, Липовский, 1980; Терехов, Левицкий, 1991; Серебряков, 2007 и др.].

В 1970–80-е годы ПО «Северкварцсамоцветы» проводило поисковые и поисково-оценочные работы на нескольких объектах Карело-Кольского региона с целью оценки корундов на коллекционное сырье [Стариков и др., 1980; Липовский и др., 1983; Глазунов и др., 1986]. Силами указанного производственного объединения осуществлялась пилотная добыча коллекционного корунда.

В миаскитовых пегматитах щелочного комплекса Хибинского массива большинство корундов непрозрачны, редко встречаются синие и голубые кристаллы, просвечивающие и прозрачные; в сиенитовых пегматитах обнаружены окрашенные сапфиры от густо-синего до фиолетового и розово-серого цветов [Липовский и др., 1983]. Корунд из ксенолита «Кукисвумчорр» имеет сине-голубой цвет и образует пластинчатые и толстотаблитчатые кристаллы размером 5–12 мм. В 1978–79 гг. ПО «Северкварцсамоцветы» на этом участке добыто 240 кг образцов коллекционного синего корунда [Меньшиков, 1978].

Ксенолит «Рыжая незнакомка» размером 9×20 м сложен сильно ожелезненными плотными тонкозернистыми роговиками полиминерального состава. Корундсодержащая зона представляет собой серию апофиз, отходящих в глубь роговиков от мощной жилы щелочного пегматита [Яковенчук и др., 1999]. Корунд отмечен в альбит-полевошпатовой матрице. Образует пластинчатые и бочонковидные кристаллы размером 5–10 мм, имеет окраску от голубой, зеленоватой и до бурой.

По данным [Peucat et al., 2007], высокое содержание Fe и Ga – характерный признак корундов магматического генезиса, в то же время корунд в ксенолитах также содержит повышенное количество Ti, что характерно для метаморфических корундов. Таким образом, для определения генезиса синего корунда высказано предположение, что высокое содержание Fe и Ti в корунде могут служить подтверждением гипотезы об исходном высокоглиноземистом протолите, представляющем архейские

сланцы и гнейсы Центрально-Кольского блока [Филина и др., 2019].

Корундсодержащие породы Беломорского подвижного пояса разделены на два типа в зависимости от их приуроченности к породам разного литологического состава. 1 тип – корундсодержащие породы в глиноземистых плагиогнейсах, 2 тип – корундсодержащие породы в метабазитах. Корунд в породах 1 типа образовался в результате замещения крупных кристаллов кианита при закономерной смене парагенезисов от вмещающих гнейсов к корундсодержащим породам. Они формировались в условиях повышенной активности Na и Ca. В породах 2 типа корунд образован в результате одновременных реакций замещения кианита, сапфирина, шпинели и хегбомита, причем замещение кианита происходит при закономерной смене парагенезисов от вмещающих метабазитов к корундсодержащим породам в условиях повышенной активности K и Mg. Вообще, корундсодержащие метапелиты и метабазиты в природе встречаются редко. Они относятся к недосыщенным кремнеземом породам.

### Геологическая и минералогическая характеристика проявления корундов Хитостров

Среди коренных объектов метаморфогенного происхождения, возникших в результате интенсивного проявления процессов мигматизации и базификации, корунды Хитострова представляют потенциал корундообразующих комплексов Беломорского подвижного пояса, являющихся важной составляющей частью Карело-Кольской корундоносной провинции [Терехов, Левицкий, 1991].

Первые находки коллекционных корундов на севере Карелии относятся по времени к 60-м годам прошлого столетия и сделаны при проведении поисково-съёмочных работ Северной геологической экспедицией под руководством Е. П. Чуйкиной [Чуйкина и др., 1971]. В дальнейшем на этом объекте осуществлены поисково-оценочные и разведочные работы на коллекционный корунд силами экспедиции «Северкварцсамоцветы» в 1970–80-е годы [Стариков, 1980]. Промышленная корундовая минерализация установлена в трех зонах – Северной, Новой и Юбилейной. Это послужило основанием для постановки тематических работ, связанных с расширением поисков корундовой минерализации в пределах Беломорского подвижного пояса. Основные проявления корундовой минерализации Северной Карелии показаны на схеме (рис. 1), при этом с геохи-

мической позиции корунды по своим характеристикам соответствуют рубинам, хотя на проявлении Дядина гора помимо рубинов обнаружены сапфирины [Глазунов и др., 1986].

Породы одного из проявлений корунда на острове Хит оз. Верхнее Пулонгское впервые описал В. И. Лебедев с сотрудниками [1974]. Они рассматривали корундообразование на Хитострове как результат метаморфического преобразования глинистых осадков. В дальнейшем исследователи пришли к точке зрения о связи корундообразования с метасоматическими процессами [Буканов, Липовский, 1980; Глебовицкий, Бушмин, 1983; Терехов, Левицкий, 1991; Другова, 1999; Серебряков, 2004; Крылов и др., 2011 и др.].

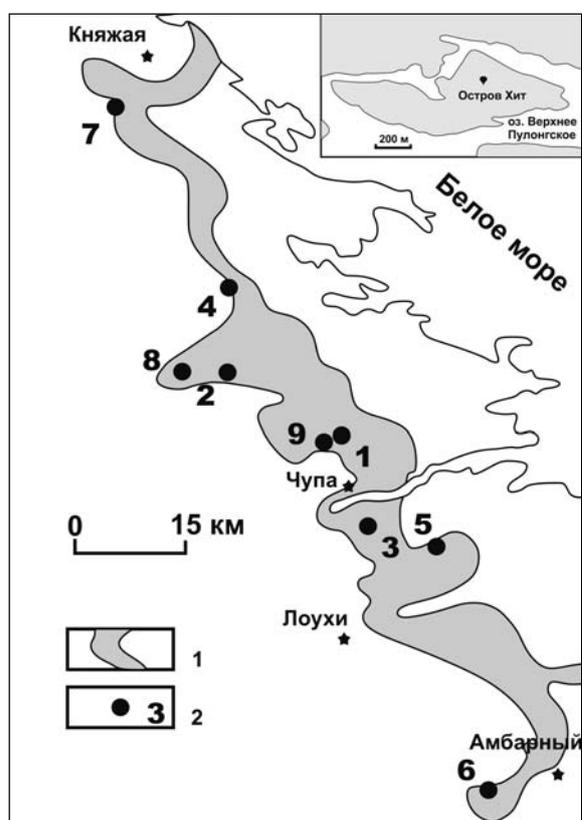


Рис. 1. Корундсодержащие породы чупинской толщи: 1 – чупинская толща; 2 – проявления корундсодержащих пород (1 – Хитостров; 2 – Дядина гора; 3 – Варацкое; 4 – Высота 128; 5 – Плотина; 6 – Кулежма; 7 – Лягколамбина; 8 – Миронова губа; 9 – Пулонгское)

Fig. 1. Locations of occurrences of corundum-bearing rocks of the Chupa sequence: 1 – Chupa sequence; 2 – occurrences of corundum-bearing rocks (1 – Khitostrov; 2 – Dyadina gora; 3 – Varatskoe; 4 – Vysota 128; 5 – Plotina; 6 – Kulezhma; 7 – Lyagkolambina; 8 – Mironova Guba; 9 – Pulongskoe)

На схематической карте (рис. 2) значительное место отводится мигматизированным гнейсам в том или ином соотношении с гранатом, ставролитом, биотитом и кианитом, при этом, по мнению Ю. А. Миллера с соавторами [1999], в первоначальном виде природа гнейсов трактуется как протолиты, представленные граувакками вулканогенно-осадочных толщ.

Корундовая минерализация приурочена к ставролит-гранат-биотит-роговообманковым гнейсам, которые подстилаются гранат-биотитовыми и кианит-гранат-биотитовыми гнейсами и перекрываются гранатовыми амфиболитами. Наибольшие концентрации корунда отмечаются возле прослоев, секущих прожилков и жил существенно плагиоклазового состава. Участки концентрации корунда, или корундовые зоны, имеют длину по простиранию от 15 до 60 м при мощности от 5 до 20 м. Такие зоны ограничены разломами и выделяются в рельефе приподнятыми блоками высотой до 5 м. Корунды локализуются преимущественно в

гнейсах на контакте с плагиоклазитами и реже в самих плагиоклазитах.

На проявлении Хитостров содержится до 5–7 % коллекционных кристаллов корунда. Ресурсы коллекционного сырья подсчитаны на глубину 2 м, проведена его пробная отработка. Запасы корунда по категории С<sub>2</sub> оценены в 35,8 т при содержании 0,4–5 кг/м<sup>3</sup> [Стариков, 1980]. Основная масса с мелкими кристаллами корунда и граната не оценивалась. Ландшафт острова благоприятен для открытых маломасштабных горных работ.

Для всех корундосодержащих пород характерно увеличение содержания Na<sub>2</sub>O и TiO<sub>2</sub> (1–4 мас. %), а также Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (370–540 ppm), по данным детальных исследований Н. С. Серебрякова [2004].

Корунд распределен в породе неравномерно, крупные кристаллы представлены хорошо ограниченными и идиоморфными с четко выраженными гранями пинакоида и гексагональной призмы, средний размер крупных кристаллов

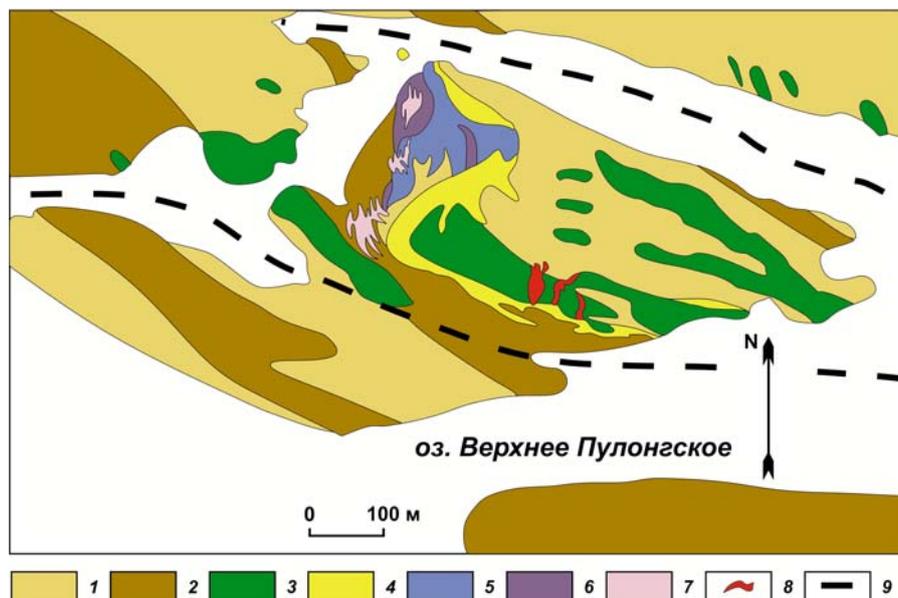


Рис. 2. Схема геологического строения проявления Хитостров [Чуйкина и др., 1971, с изменениями]:

1 – гранат-биотитовые гнейсы чупинской толщи; 2 – кианит-гранат-биотитовые, бескварцевые «гнейсы» (вблизи контакта с корундосодержащими породами); 3 – габбро и габбро-амфиболиты; 4 – мигматизированные гранатовые амфиболиты; 5 – породы со ставролит-плагиоклазовыми псевдоморфозами по кианиту; 6 – породы с корунд-ставролит-плагиоклазовыми псевдоморфозами и с крупными кристаллами корунда; 7 – плагиоклазиты; 8 – пегматиты; 9 – разломы

Fig. 2. Scheme of the geological structure of the Khitostrov occurrence [modified after Chuikina et al., 1971]:

1 – garnet-biotite gneisses of the Chupa sequence; 2 – kyanite-garnet-biotite, quartz-free “gneisses” (near contacts with corundum-bearing rocks); 3 – gabbro and gabbro-amphibolites; 4 – migmatized garnet amphibolites; 5 – rocks with staurolite-plagioclase pseudomorphoses after kyanite; 6 – rocks with corundum-staurolite-plagioclase pseudomorphoses and with large corundum crystals; 7 – plagioclases; 8 – pegmatites; 9 – fractures

корунда составляет 1,3 см в длину, отдельные кристаллы достигают 4,2 см. Более мелкие кристаллы представлены изометричными зернами размерами 0,46×0,93; 0,77×0,82; 0,34×1,15 и 0,24×0,23 мм. Облик кристаллов столбчатый, удлинённый по оси  $L_3$ , реже бочковидный или таблитчатый [Громов, 1993]. Цвет корунда – от серовато-розового и бледно-розового до ярко-розового, фиолетово-розового и вишневого. Прозрачные индивиды отсутствуют из-за наличия газово-жидких и минеральных включений, а также мелкой трещиноватости (отдельности) параллельно грани ромбоэдра. Присутствуют и более мелкие (1–3 мм) кристаллы корунда. Содержание корунда, подсчитанное в шлифах, колеблется от 0,1 до 5–7 %.

На Хитострове присутствуют кианитовые плагиогнейсы, в которых кианит равновесен со всеми породообразующими минералами (плагиоклаз, биотит, гранат, кварц). Кианит относится ко второму коллекционному минералу на данном объекте. Главная масса коллекционных образцов кианита добыта в 1980-е годы старателями в восточной части месторождения. Небольшой копьё (глубиной 1,5–2 и длиной около 10 м) вскрыт обогащённый крупными кристаллами кианита прослой гнейсов на контакте между плагиоклазитами и обычным биотитовым гнейсом без кианита. Самые крупные кристаллы, до 15–20 см в длину, найдены в разрывах кианитсодержащего прослоя гнейсов.

Мультиэлементное картирование и анализ вариаций химического состава отдельных минералов выполнялись на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) (ИГ КарНЦ РАН).

Породообразующие минералы представлены плагиоклазом № 20-26, содержание которого колеблется в пределах от 0–5 % в меланократовых породах, до 90–95 % в плагиоклазитах. Зерна ставролита ромбической и округлой формы, светло-желтого до насыщенного желтого цвета, размеры от 0,1×0,7 до 5,2×4,4 мм. Практически все зерна ставролита трещиноваты и содержат включения плагиоклаза и аксессуарных рутила, циркона, аллана. Гранат наблюдается в виде сильно трещиноватых изометричных зерен размером от 0,2–0,3 до 4–5 мм, кристаллохимическая формула  $(Ca_{0,3}Fe_{1,77}Mg_{0,96})_3Al_{2,04}Si_{3,00}O_{12}$  соответствует гроссуляр-пироп-альмандиновому составу. Зерна амфибола размером от 0,16×0,22 до 1,6×2,8 мм. Малокремниевый жедрит является распространенной разновидностью в корундсодержащих породах. Биотит присутствует в виде разноориентированных лейст

со значительной хлоритизацией и характеризуется повышенным содержанием MgO.

Корундсодержащие разновидности Хитострова составляют пласто- и линзообразные тела. Конфигурация сложная, с извилистыми и неровными границами. Подавляющее число кристаллов хитостровского корунда содержат минеральные включения, главным образом граната, плагиоклаза, рутила, ильменита, циркона. По трещинкам наблюдаются слюдястые включения и агрегаты диаспора. Изучение поверхности кристаллов корунда, «загрязненного» минеральными включениями, проведено на лазерном микроскопе Color 3D VK-9710K. Анализ характера включений показал, что ширина характерных слоев с диаспором может достигать 100 мкм при их глубине 20–30 мкм.

В последние годы, судя по публикациям [Крылов и др., 2012; Акимова, Скублов, 2021 и др.], нашли свое место детальные исследования по распределению редкоземельных элементов (метод SIMS) в минералах из пород проявления корундсодержащих метасоматитов с аномальным изотопно-легким кислородом и водородом и апогаббровых гранатовых амфиболитов с нормальным изотопным составом. Исследования сопровождались оценками РТ-параметров формирования пород методом мультиравновесной термобарометрии (метод TWEEQU). Значения температуры, рассчитанные для апогаббровых гранатовых амфиболитов, укладываются в диапазон 730–770 °С, давления – 13–14 кбар, для корундсодержащих пород получены температуры 680–710 °С, давления – 6,5–7,5 кбар.

Важные выводы сделаны рядом исследователей по данным, полученным из анализа изотопного состава кислорода разновозрастных популяций циркона из толщи чупинских гнейсов в районе Хитострова. Цель исследований заключалась в определении возможного влияния флюидов, вызвавших экстремальное понижение значений  $\delta^{18}O$  во включениях недосыщенных кремнеземом высокоглиноземистых корундсодержащих пород [Крылов, 2008; Высоцкий и др., 2014; Крылов и др., 2021 и др.].

В области минералого-технологических исследований корундов одной из величин, характеризующих минерал, является микротвердость. Определение микротвердости корунда проявления Хитостров производилось по стандартной методике на приборе ПМТ-3 путем вдавливания правильной четырехгранной алмазной пирамиды под нагрузкой от 5 до 200 гс в плоскую поверхность полированных образцов [Бубнова и др., 2019].

Средняя микротвердость кристаллов корунда, по литературным данным, составляет 1955–2200 кгс/мм<sup>2</sup> [Лебедева, 1977]. Для корунда проявления Хитостров характерна анизотропия значений микротвердости, что отражается в разбросе численных значений от 1775 до 2597 кгс/мм<sup>2</sup>. Наблюдается существенный разброс значений микротвердости и для роговой обманки, что также связано с анизотропией физических свойств этого минерала (рис. 3). Микротвердость наиболее низка в кристаллах корунда, находящихся в ассоциации с диаспором, плагиоклазом (рис. 4). Ее значения

снижаются до 1463–1661 кгс/мм<sup>2</sup> при среднем 1553 кгс/мм<sup>2</sup>. В образцах, где корунд находится в ассоциации с амфиболом, микротвердость близка к литературным данным.

### Способы вскрытия корундосодержащих пород Хитострова

Процесс добычи и переработки полезных ископаемых сопровождается стадиями дробления и измельчения с целью извлечения ценных минералов. При этом на стадиях обогащательного передела измельчение горных

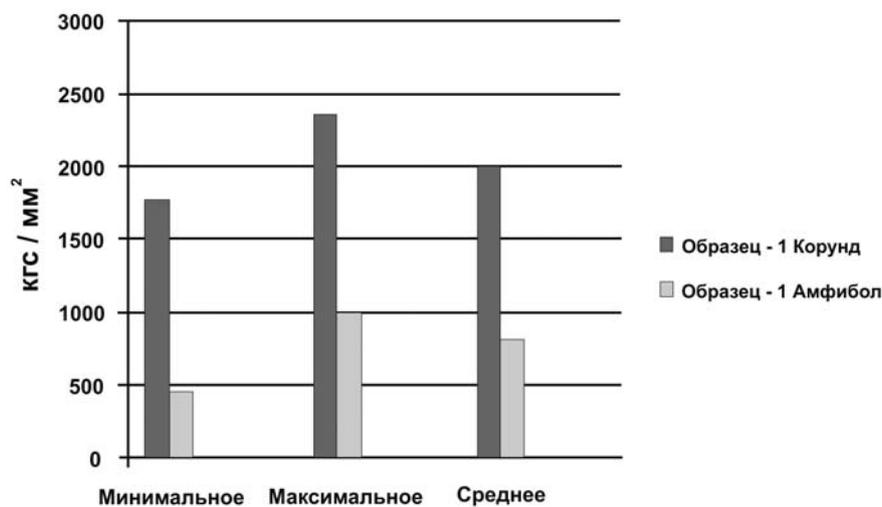


Рис. 3. Микротвердость породообразующих минералов корундовых гнейсов проявления Хитостров, Н, кгс/мм<sup>2</sup> (образец 1)

Fig. 3. Microhardness of rock-forming minerals in corundum gneisses of the Khitostrov occurrence, N, kgf/mm<sup>2</sup> (sample 1)

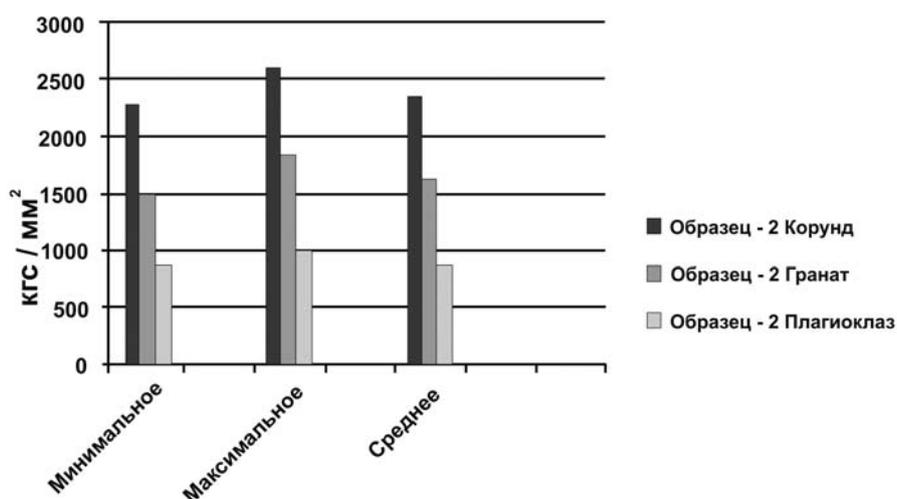


Рис. 4. Микротвердость породообразующих минералов корундовых гнейсов проявления Хитостров, Н, кгс/мм<sup>2</sup> (образец 2)

Fig. 4. Microhardness of rock-forming minerals in corundum gneisses of the Khitostrov occurrence, N, kgf/mm<sup>2</sup> (sample 2)

пород – наиболее энергоемкий и дорогостоящий технологический процесс. Один из путей повышения технико-экономической эффективности обогащительного передела – селективная дезинтеграция, позволяющая увеличить выход минерального сырья и снизить энергозатраты за счет понижения степени измельчения при увеличении размеров конечной фракции. Проблема селективной дезинтеграции особенно актуальна при добыче ювелирного сырья, для которого размер конечного продукта очень важен [Хопунов, 2013; Барнов, Каркашадзе, 2017].

Минералы корунда в продуктивных толщах отличает большое разнообразие форм. Весьма актуальной технической задачей является именно селективная дезинтеграция с целью максимального сохранения благородного корунда. Необходимо обеспечить дезинтеграцию горной породы по граничной поверхности ценного минерала и вмещающей минеральной среды. В промышленных масштабах поставленная задача может быть решена путем рационального выбора дробильно-измельчительно-оборудования и оптимизации механизмов направленного механического и физического воздействия [Ревнивцев и др., 1988].

Используемые на практике машины для дробления материалов в зависимости от своего назначения и принципа действия реализуют следующие методы разрушения: раздавливание, ударное воздействие, раскалывание и излом. При этом одновременно могут реализовываться несколько механизмов разрушения в зависимости от режимов работы дробилок [Газалеева и др., 2014]. Исследования представляют интерес при разработке новых технологий селективной дезинтеграции с выделением ценных и ювелирных минералов [Федотов, 2014; Барнов, Каркашадзе, 2017].

Особого внимания заслуживают месторождения корунда. В минеральном строении таких горных пород общей структурной особенностью является материнская порода с включениями корунда и рубина с разнообразными размерами и конфигурацией. Выделение этих минералов из материнской породы без переизмельчения представляет большой практический интерес. Установлено, что из всех проанализированных механизмов разрушения наилучшая селективность достигается при дроблении «в слое», когда куски горной породы дезинтегрируются в условиях всестороннего сжатия.

Разработана методика расчета эффективности селективного дробления, которая может быть использована при сравнительном анализе различных режимов силового воздействия.

Наилучшие результаты селективного дробления достигаются при реализации режимов всестороннего сжатия, в том числе при сжатии «в слое». Положительный эффект подтвержден лабораторными испытаниями. Ниже приводятся результаты по технологиям вскрытия корундосодержащих пород на примере проявления метаморфогенного типа Хитостров.

По вещественному составу корундоносные породы проявления Хитостров существенно отличаются соотношением основных породообразующих минералов, слагая изолированные блоки. Основные породообразующие минералы в руде отличаются по форме, плотности, твердости и магнитным свойствам. Наиболее четко проявляются различия по блеску, цвету и прозрачности.

На предварительной стадии обработки минерального сырья (процессы дробления, измельчения) первостепенную роль играют механические свойства минералов – твердость, предел упругости, пластичность и др.

На образцах корундовой руды проявления Хитостров установлено, что биотит в породе после обжига при температуре 550–600 °С расщепляется и порода рассыпается на составляющие минералы без дробления и измельчения.

### **Оценка эффективности использования оптической сепарации корундовых руд**

В последние годы в горнодобывающей промышленности активно развиваются оптические технологии. В России в применении к ним широко используется термин «фотометрические», за рубежом – «color sorting» и «optical sorting». Одним из перспективных методов обогащения является оптическая сепарация [Forsthoff, 2000; Knapp et al., 2014; Pieper et al., 2018], потенциально эффективная для обогащения минерального сырья. Принцип работы оптических сепараторов основан на определении цветовых различий между минеральными компонентами с их последующим выделением из руды системой пневмоклапанов. В технологиях технического зрения используются специально разработанные оптико-электронные системы и алгоритмы анализа изображений, позволяющие разделять минералы даже со слабой цветовой контрастностью [Горбунова и др., 2015].

Совместные исследования, проведенные на стенде для цветового анализа статических объектов кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург), позволили установить объективные (измеряемые) отличия оптических характеристик для образцов различных минералов и в преде-

лах одного минерала. В ходе измерения спектров отражения корунда получены спектральные зависимости с узкими пиками люминесценции на длине волны в 693 нм, характеризующими чистый корунд. А также с вторичными пиками на 660, 670, 706 и 714 нм (области других цветовых оттенков). Анализ цветовых параметров, в том числе цветовые тона, светлота и насыщенность, осуществлялся в различных цветовых моделях: RGB (от англ. *red* – красный, *green* – зеленый, *blue* – голубой, синий; все цвета получаются путем смешения этих трех базовых цветов в различных пропорциях), Yuv (цветовая модель, в которой цвет состоит из трех компонентов: Y обозначает компонент яркости, а U и V – компоненты цветности) и HLS (от англ. *hue*, *lightness*, *saturation*; цветовыми координатами в этой модели являются тон, светлота и насыщенность). В цветовых пространствах RGB, Yuv и HLS зоны корунда выделяются достаточно эффективно. Для модели RGB зоны цветности, характеризующие корунд, занимают 44,68 %

от изображения образца, для модели Yuv – 40,85 %, для модели HLS – 51,47 %.

Значения порогов выделения областей, принадлежащих корунду, в цветовых пространствах RGB, Yuv и HLS различны, но более стабильны и предсказуемы в системе HLS (табл.). Этот факт объясняется принципами воспроизведения цвета в каждом из указанных цветовых пространств (необходимый диапазон выделяемых цветовых оттенков в пространстве RGB задается при помощи эллипсоида вращения, заданного центральной точкой с координатами R0, G0 и B0, а также радиусами по осям R, G и B; для пространств Yuv и HLS удобно использовать линейные пороги для выделения диапазонов цветовых оттенков).

Оптическая сепарация корундовых руд возможна с использованием любой из моделей технического зрения. Сложность оценки эффективности выделения областей корунда на изображениях для полиминеральных образцов связана с тем, что многокомпонентный цвет

Значения порогов выделения областей, принадлежащих корунду проявления Хитостров, в цветовых пространствах RGB, Yuv и HLS [Бубнова и др., 2019]

Threshold values for highlighting areas belonging to the Khitostrov corundum in RGB, Yuv and HLS colour spaces [Bubnova et al., 2019]

Группа образцов Sample group	Цветовое пространство RGB RGB colour space					
	R0	радиус R radius R	G0	радиус G radius G	B0	радиус B radius B
1	124	40	101	20	133	40
	90	40	85	20	103	40
	85	40	61	20	90	40
2	40	101	20	133	40	
	40	85	20	103	40	
	40	61	20	90	40	
3	25	20	30	15	50	20
4	60	20	60	20	70	20
5	40	20	35	5	40	20
	15	10	20	5	25	10
	Цветовое пространство Yuv Yuv colour space					
	Y		u		v	
1	[1; 70)		[0; 4,36)		[-0,12; 6,15)	
2	[1; 70)		[0; 4,36)		[-0,12; 6,15)	
3	[6; 25)		[0,15; 4,36)		[-0,6; 0,4)	
4	[10; 60)		[-0,1; 4,36)		[-0,6; 6,15)	
5	[5; 30)		[0; 0,4)		[-0,25; 0,2)	
	Цветовое пространство HLS HLS colour space					
	H		L		S	
1	[220; 360)		[1; 70)		[1; 100)	
2	[220; 360)		[1; 70)		[1; 100)	
3	[200; 300)		[1; 25)		[5; 100)	
4	[150; 250)		[12; 60)		[1; 100)	
5	[180; 360)		[3; 15)		[1; 45)	

вещающей породы перекликается с выделяемыми оттенками корунда. Таким образом, реальную эффективность оптической технологии необходимо исследовать экспериментально на значительном количестве образцов разных минеральных составов, текстурно-структурных характеристик и других типоморфных особенностей.

## Заключение

Уникальность проявления корунда Хитостров состоит в том, что действительно в Северной Карелии найдены корундовые руды, которые уже на протяжении полувека являются объектом научного и практического интереса как ключ к раскрытию тайн природы. Этот геологический объект приобрел статус месторождения коллекционного камня, что привлекло внимание геологов, минералогов и любителей камня.

В данной статье с учетом многостороннего интереса проведено обобщение целого ряда собственных и литературных данных научного содержания по наиболее изученному объекту редкого самоцвета – корунда с ювелирными разновидностями под названиями рубины и сапфиры. На основании знаний по геологии и минералого-технологическим особенностям известного проявления делается заключение о комплексной оценке проявления корундов Хитостров как главного представителя Карело-Кольской сапфир-рубиноносной провинции. Полученные результаты научных исследований пополняют базу данных уникального геологического объекта и стали эталонными для оценки на корунды области Беломорского подвижного пояса.

В 2020 году вышло постановление правительства Республики Карелия № 380-П о геологическом памятнике природы регионального значения «Хитостров».

*Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания и советы.*

## Литература

Акимова Е. Ю., Скублов С. Г. Распределение редкоземельных элементов в породообразующих минералах корундсодержащих пород проявления Хитостров (Северная Карелия) // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2021. Т. 66(4). С. 686–705. doi: 10.21638/spbu07.2021.403

Барнов Н. Г., Каркашадзе Г. Г. Обоснование механизма селективной дезинтеграции горных пород с целью извлечения цельного камнесамоцветного сырья // Горный журнал. 2017. № 1. С. 47–49. doi: 10.17580/gzh.2017.01.09

Барнов Н. Г., Мельников Е. П. Генетические типы благородных корундов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 79–85.

Барнов Н. Г., Мельников Е. П., Викторов М. А. Минералогия месторождения благородных корундов мира // Отечественная геология. 2016. № 1. С. 39–45.

Барнов Н. Г., Щипцов В. В. Сводный обзор месторождений и крупных проявлений благородных корундов мира // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 10. С. 78–87. doi: 10.17076/geo1488

Бубнова Т. П., Барнов Н. Г., Горбунова Е. В., Чертов А. Н. Характеристики вещественного состава, определяющие обогатимость корундсодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 4. С. 162–174. doi: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-162-174

Буканов В. В., Липовский Ю. О. Новые находки благородного корунда в восточной части Балтийского щита // Самоцветы. Л.: Наука, 1980. С. 34–43.

Высоцкий С. В., Щека С. А., Баркар А. В., Нечаев В. П. Приморье – фрагмент Восточно-Азиатского сапфирного пояса // Вестник ДВО РАН. 2003. № 6. С. 57–66.

Высоцкий С. В., Игнатъев А. В., Левицкий В. И., Нечаев В. П., Веливецкая Т. А., Яковенко В. В. Геохимия стабильных изотопов кислорода и водорода корундоносных пород и минералов Северной Карелии как индикатор необычных условий их формирования // Геохимия. 2014. № 9. С. 843–853. doi: 10.7868/S0016752514090106

Газалеева Г. И., Цыпин С. А., Червяков Е. Ф. Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение. Екатеринбург: УЦАО, 2014. 914 с.

Глазунов В. М., Кузина Н. В., Моисеев Д. В. Отчет о поисковых работах на ограниченный корунд в Северной Карелии и на Кольском полуострове (объект Дядиногорский) за 1985–86 годы. 1986. Фонды «Северкварцсамоцветы».

Глебовицкий В. А., Бушмин С. А. Послемигматовый метасоматоз. Л.: Наука, 1983. 216 с.

Горбунова Е. В., Чертов А. Н., Ольховский А. М. Влияние цветового пространства на эффективность оптической сепарации твердых полезных ископаемых // Обогащение руд. 2015. № 3(357). С. 35–40. doi: 10.17580/or.2015.03.06

Громов А. В. Розовый корунд из Хитостровского проявления в Северной Карелии // Мир камня. 1993. № 2. С. 1–3

Другова Г. М. Главные этапы метаморфической эволюции чупинской толщи Беломорского складчатого пояса // ЗВМО. 1999. № 3. С. 49–57.

Крылов Д. П. Аномальные отношения  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в корундсодержащих породах Хитострова (Северная Карелия) // Докл. РАН. 2008. Т. 419, № 4. С. 533–536.

Крылов Д. П., Сальникова Е. Б., Федосеев А. М., Яковлева С. З., Плоткина Ю. В., Анисимова И. В. Возраст и происхождение корундсодержащих пород о-ва Хитоостров, Северная Карелия // Петрология. 2011. Т. 19, № 1. С. 80–88.

Крылов Д. П., Скублов С. Г., Ли С.-Х., Ли Ч.-Л., Левашова Е. В. Изотопный состав кислорода разновозрастного циркона из гнейсов чупинской тол-

щи (Хитостров, оз. Верхнее Пулонгское), Беломорье // Зап. РМО. 2021. Т. 150, № 6. С. 18–27.

Крылов Д. П., Глебовицкий В. А., Скублов С. Г., Толмачева Е. В. Редкоземельные и редкие элементы в разновозрастных цирконах из корундсодержащих пород Хитострова (Северная Карелия) // ДАН. 2012. Т. 443(3). С. 352–357.

Лебедев В. И., Калмыкова Н. А., Нагайцев Ю. В. Корунд-ставролит-роговообманковые сланцы Беломорского комплекса // Советская геология. 1974. № 9. С. 78–89.

Лебедева С. И. Микротвердость минералов. М.: Недра, 1977. 118 с.

Липовский Ю. О. и др. Отчет о результатах поисковых работ на ограночный корунд и коллекционное сырье в щелочных массивах Кольского п-ова, проведенных в 1980–82 гг. Л.: Фонды СЗТГУ, 1983.

Меньшиков Ю. П. Корундовая минерализация в Хибинском щелочном массиве // ДАН СССР. 1978. Т. 243(5). С. 1247–1249.

Миллер Ю. В., Глебовицкий В. А., Мыскова Т. А., Львов А. Б., Милькевич Р. И. Новые данные о составе, структурной позиции и геотектонической значимости Чупинского покрова Беломорского подвижного пояса // ДАН. 1999. Т. 366, № 3. С. 379–382.

Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Загоратский Л. П. Селективное разрушение минералов. Л.-М.: Недра, 1988. 430 с.

Серебряков Н. С. Корундсодержащие породы проявления Перуселька, Мурманская область // Геология и минерагения Кольского региона. Тр. Всерос. научн. конф. IV Ферсмановской научн. сессии, посвящ. 90-летию со дня рождения акад. А. В. Сидоренко и д.г.-м.н. И. В. Белькова. Апатиты, 4–6 июня 2007 г. Апатиты: K&M, 2007. С. 127–129.

Серебряков Н. С. Петрология корундсодержащих пород чупинской толщи Беломорского подвижного пояса (на примере Чупинского сегмента): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2004. 30 с.

Стариков Ю. И. Отчет о результатах детальных поисковых работ на коллекционное сырье, проведенных в Карело-Кольском регионе (объект Хитостров) за 1978–1980 гг. 1980. Фонды «Северкварцсамоцветы».

Терехов Е. Н., Левицкий В. И. Геолого-структурные закономерности размещения корундовой минерализации в северо-западном Беломорье // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1991. № 6. С. 3–13.

Федотов П. К. Теория и практика дезинтеграции руды в слое частиц: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Иркутск, 2014. 48 с.

Филина М. И., Сорокина Е. С., Аносова М. О., Кононкова Н. Н., Лютцов О. Е. Новые данные по геохимии корунда метасоматизированных ксенолитов «Рыжая незнакомка» и «Кукисвумчорр», Хибинский щелочной массив (Кольский полуостров) // Тр. Ферсмановской научн. сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. С. 602–606. doi: 10.31241/FNS.2019.16.123

Холунов Э. А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья. Екатеринбург: УИПЦ, 2013. 429 с.

Чуйкина Е. П., Арутюнов Г. М., Едовин В. И. и др. Отчет Центрально-Чупинской поисково-съёмочной

партии о геологосъёмочных и поисковых работах масштаба 1:10 000, проведенных в 1963–70 гг. в Чупино-Лоухском слюдоносном районе (Лоухский район Карельской АССР). 1971, СЗТГФ.

Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Меньшиков Ю. П. Минералы Хибинского массива. М.: Земля, 1999. 326 с.

Forsthoft W. Optical sorting of coarse materials // ZKG International. 2000. Vol. 53, no. 6. P. 331–339.

Garnier V., Maluski H., Giuliani G., Ohnenstetter D., Schwarz D. Ar-Ar and U-Pb ages of marble hosted ruby deposits from central and south East Asia // Can. J. Earth Sci. 2006. Vol. 43. P. 1–23.

Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Maluski H., Deloule E., Phan T. T., Pham V. L., Hoang Q. V. Age and significance of ruby-bearing marbles from the Red River shear zone, northern Vietnam // Can. Mineral. 2004. Vol. 43. P. 1315–1329. doi: 10.2113/gscanmin.43.4.1315

Giuliani G., Groat L. A., Fallick A. E., Pignatelli I., Pardiou V. Ruby deposits: A review and geological classification // Minerals. 2020. No. 10. P. 11–93. doi: 10.3390/min10070597

Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A. E., Groat L., Fagan J. The geology and genesis of gem corundum deposits // Geology of Gem Deposits; ed. Groat L. A. Tucson, AZ, USA: Mineralogical Association of Canada, 2014. Short Course Series. Vol. 44. P. 29–112.

Knapp H., Neubert K., Schropp Ch., Wotruba H. Viable applications of sensor-based sorting for the processing of mineral resources // ChemBioEng Review. 2014. Vol. 1. P. 86–95. doi: 10.1002/cben.201400011

Kroner A. Late Precambrian plate tectonics and orogeny: A need to redefine the term Pan-African // African Geology; Eds. Klerkx J., Michot J. Tervuren Musée Royal de l'Afrique Centrale: Tervuren, Belgium, 1984. P. 23–28.

Litvinenko A. K., Sorokina E. S., Häger T., Kostitsyn Z. A., Botcharnikov R. E., Somsikova T., Romashova T. V., Hofmeister W. Petrogenesis of the Snezhnoe ruby deposit, Central Pamir // Minerals. 2020. Vol. 10. Art. 478. doi: 10.3390/min10050478

Peucat J. J., Ruffault P., Fritsch E., Bouhnik-Le-Coz M., Simonet C., Lasnier B. Ga/Mg ratio as a new geochemical tool to differentiate magmatic from metamorphic blue sapphires // Lithos. 2007. Vol. 98. P. 261–274. doi: 10.1016/j.lithos.2007.05.001

Pieper F., Pfaff G., Maier H., Kruggel-Emden H., Wirtz S., Noack B., Gruna R., Scherer V., Hanebeck U. D., Längle Th., Beyerer J. Numerical modelling of an optical belt sorter using a DEM-CFD approach coupled with particle tracking and comparison with experiments // Powder Technology. 2018. Vol. 340. P. 181–193. doi: 10.1016/j.powtec.2018.09.003

Polat A., Schersten A., Appel P. W. U., Frei R. New age (ca. 2970 Ma), mantle source composition and geodynamic constraints on the Archean Fiskefjorden anorthosite complex, SW Greenland // Chemical Geology. 2010. Vol. 277(1). P. 1–20. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.06.016

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. Second edition, online version. 2015. 160 p.

Sutherland F., Zaw K. Editorial for special issue "Mineralogy and Geochemistry of Ruby" // Minerals. 2020. Vol. 10(10). Art. 888. doi: 10.3390/min10100888

Sutherland F. L., Khin Z., Meffre F., Thompson J., Goemann K., Kyaw T., Than T. N., Mhod Z. M., Harris S. I. Diversity in ruby chemistry and its inclusions: Intra and inter-continental comparisons from Myanmar and Eastern Australia // Minerals. 2019. Vol. 9(1). Art. 28. doi: 10.3390/min9010028

Sutherland F. L., Schwarz D., Jobbins E. A., Coenraads R. R., Webb G. Distinctive gem corundum suites from discrete basalt fields: A comparative study of Barrington, Australia, and West Pailin, Cambodia, gemfields // J. Gemmol. 1998. Vol. 26. P. 65–85.

## References

Akimova E. Yu., Skublov S. G. Distribution of rare-earth elements in rock-forming minerals of corundum-bearing rocks of the Khitoostrov manifestation (Northern Karelia). *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*. 2021;66(4):686–705. doi: 10.21638/spbu07.2021.403 (In Russ.)

Barnov N. G., Karkashadze G. G. Evaluation of selective disintegration mechanism for extraction of whole semi-precious stones. *Gornyi Zhurnal*. 2017;1:47–49. doi: 10.17580/gzh.2017.01.09 (In Russ.)

Barnov N. G., Mel'nikov E. P. Genetic types of noble corundum. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Information and Analytical Bulletin*. 2015;6:79–85. (In Russ.)

Barnov N. G., Mel'nikov E. P., Viktorov M. A. Mineralogy of noble corundum fields of the world. *Otechestvennaya geologiya = National Geology*. 2016;1:39–45. (In Russ.)

Barnov N. G., Shchiptsov V. V. A summary overview of deposits and large occurrences of noble Precambrian corundum in the world. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2021;10:78–87. doi: 10.17076/geo1488 (In Russ.)

Bubnova T. P., Barnov N. G., Gorbunova E. V., Chertov A. N. Material constitution characteristics governing processibility of corundum ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;4:162–174. doi: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-162-174 (In Russ.)

Bukanov V. V., Lipovskii Yu. O. New finds of noble corundum in the eastern part of the Baltic Shield. *Samotsvety = Gem Stones*. Leningrad: Nauka; 1980. P. 34–43. (In Russ.)

Chuiikina E. P., Arutyunov G. M., Edovin V. I. et al. Report of the Central Chupinskaya Prospecting and Exploration Party on the geological and prospecting surveys at 1:10.000 scale conducted in 1963–70 in the Chupino-Loukhsy Mica District (Loukhsy District, Karelian ASSR). 1971, NWTGF. (In Russ.)

Drugova G. M. Main stages of metamorphic evolution of the Chupa Formation of the White Sea Fold Belt. *3BMO*. 1999;3:49–57. (In Russ.)

Fedotov P. K. Theory and practice of ore disintegration in the particle bed: Summary DSc (Dr. of Geol.-Min.) thesis. Irkutsk; 2014. 48 p. (In Russ.)

Filina M. I., Sorokina E. S., Anosova M. O., Kononkova N. N., Lyuttskov O. E. New data on geochemistry of metasomatized corundum-bearing of the "Ryzhaya neznakomka" and "Kukisvumchorr" xenoliths, Khibiny alkaline massif (Kola Peninsula). *Proceedings of Fersman scientific session of the State Institute of the Kola Peninsula of the Russian Academy of Sciences*. 2019:602–606. doi: 10.31241/FNS.2019.16.123 (In Russ.)

Forsthoft W. Optical sorting of coarse materials. *ZKG International*. 2000;53(6):331–339.

Garnier V., Maluski H., Giuliani G., Ohnenstetter D., Schwarz D. Ar-Ar and U-Pb ages of marble hosted ruby deposits from central and south East Asia. *Can. J. Earth Sci.* 2006;43:1–23.

Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Maluski H., Deloule E., Phan T. T., Pham V. L., Hoang Q. V. Age and significance of ruby-bearing marbles from the Red River shear zone, northern Vietnam. *Can. Mineral.* 2004;43:1315–1329. doi: 10.2113/gscanmin.43.4.1315

Gazaleeva G. I., Tsy-pin S. A., Chervyakov E. F. Ore crushing, screening, enrichment. Yekaterinburg: UCAO LLC; 2014. 914 p. (In Russ.)

Giuliani G., Groat L. A., Fallick A. E., Pignatelli I., Pardieu V. Ruby deposits: A review and geological classification. *Minerals*. 2020;10:11–93. doi: 10.3390/min10070597

Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A. E., Groat L., Fagan J. The geology and genesis of gem corundum deposits. *Geology of Gem Deposits*. Tucson, AZ, USA: Mineralogical Association of Canada; 2014. Short Course Series. Vol. 44. P. 29–112.

Glazunov V. M., Kuzina N. V., Moiseev D. V. Report on prospecting for faceted corundum in North Karelia and on the Kola Peninsula (the Dyadinogorsky object) in 1985–86. 1986. Severkvartsamotsvetovy funds. (In Russ.)

Glebovitskii V. A., Bushmin S. A. Post-migmatite metasomatism. Leningrad: Nauka; 1983. 216 p. (In Russ.)

Gorbunova E. V., Chertov A. N., Ol'khovskii A. M. Influence of color space on the efficiency of optical separation of solid minerals. *Ore Enrichment*. 2015;3(357): 35–40. doi: 10.17580/or.2015.03.06 (In Russ.)

Gromov A. V. Pink corundum from the Khitostrovsky manifestation in North Karelia. *Mir kamnya = World of Stones*. 1993;2:1–3. (In Russ.)

Khopunov E. A. Selective destruction of mineral and technogenic raw materials. Yekaterinburg: UIPC; 2013. 429 p. (In Russ.)

Knapp H., Neubert K., Schropp Ch., Wotruba H. Viable applications of sensor-based sorting for the processing of mineral resources. *ChemBioEng Review*. 2014;1:86–95. doi: 10.1002/cben.201400011

Kroner A. Late Precambrian plate tectonics and orogeny: A need to redefine the term Pan-African. *African Geology*. Tervuren, Belgium: Tervuren Musée Royal de l'Afrique Centrale; 1984. P. 23–28.

Krylov D. P. Anomalous <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O relations in corundum-bearing rocks of Khitostrov (North Karelia). *Dokl. RAN = Proceedings of the Academy of Sciences*. 2008;419(4):533–536. (In Russ.)

- Krylov D. P., Glebovitskii V. A., Skublov S. G., Tolmacheva E. V. Rare-earth and rare elements in different-age zircons from corundum-bearing rocks of Khitostrov (North Karelia). *Dokl. RAN = Proceedings of the Academy of Sciences*. 2012;443(3):352–357. (In Russ.)
- Krylov D. P., Sal'nikova E. B., Fedoseenko A. M., Yakovleva S. Z., Plotkina Y. V., Anisimova I. V. Age and origin of the corundum-bearing rocks of Khitostrov Island, Northern Karelia. *Petrology*. 2011;19(1):79–86. doi: 10.1134/S086959111101005X
- Krylov D. P., Skublov S. G., Li S.-H., Li C.-L., Levashova E. V. The oxygen isotopic composition of zircon from gneisses of the Chupinskaya sequence (Khitostrov, Upper Pulongskoe Lake), Belomor'ye. *Zap. RMO = Proceedings of the Russian Mineralogical Society*. 2021;150(6):18–27. (In Russ.)
- Lebedev V. I., Kalmykova N. A., Nagaitsev Y. V. Corundum staurolite – hornblende shales of the Belomorsky complex. *Sovetskaya geologiya = Soviet Geology*. 1974;9:78–89. (In Russ.)
- Lebedeva S. I. Microhardness of minerals. Moscow: Nedra; 1977. 118 p. (In Russ.)
- Lipovskii Yu. O. et al. Report on the results of exploration for faceted corundum and collection of raw materials in alkaline massifs of the Kola Peninsula, conducted in 1980–82. Leningrad: SZTGU funds; 1983. (In Russ.)
- Litvinenko A. K., Sorokina E. S., Häger T., Kostitsyn Z. A., Botcharnikov R. E., Somsikova T., Romashova T. V., Hofmeister W. Petrogenesis of the Snezhnoe ruby deposit, Central Pamir. *Minerals*. 2020;10:478. doi: 10.3390/min10050478
- Men'shikov Yu. P. Corundum mineralization in the Khibiny alkaline massif. *DAN SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1978;243(5):1247–1249. (In Russ.)
- Miller Yu. V., Glebovitskii V. A., Myskova T. A., L'vov A. B., Mil'kevich R. I. New data on the composition, structural position, and geotectonic significance of the Chupinskii cover of the White Sea Mobile Belt. *Dokl. RAN = Proceedings of the Academy of Sciences*. 1999;366(3):379–382. (In Russ.)
- Peucat J. J., Ruffault P., Fritch E., Bouhnik-LeCoz M., Simonet C., Lasnier B. Ga/Mg ratio as a new geochemical tool to differentiate magmatic from metamorphic blue sapphires. *Lithos*. 2007;98:261–274. doi: 10.1016/j.lithos.2007.05.001
- Pieper F., Pfaff G., Maier H., Kruggel-Emden H., Wirtz S., Noack B., Gruna R., Scherer V., Hanebeck U. D., Längle Th., Beyerer J. Numerical modelling of an optical belt sorter using a DEM–CFD approach coupled with particle tracking and comparison with experiments. *Powder Technology*. 2018;340:181–193. doi: 10.1016/j.powtec.2018.09.003
- Polat A., Schersten A., Appel P. W. U., Frei R. New age (ca. 2970 Ma), mantle source composition and geodynamic constraints on the Archean Fiskensæset anorthosite complex, SW Greenland. *Chemical Geology*. 2010;277(1):1–20. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.06.016
- Revnitsev V. I., Gaponov G. V., Zagoratskii L. P. Selective destruction of minerals. Leningrad-Moscow: Nedra; 1988. 430 p. (In Russ.)
- 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. Second edition, online version. 2015. 160 p.
- Serebryakov N. S. Corundum bearing rocks of the Peruselka manifestation, Murmansk Region. Geology and mineralogy of the Kola region. *Proceedings All-Russian scientific conf. of IV Fersman scientific session, devoted to the 90<sup>th</sup> anniversary of Acad. A. V. Sidorenko and Doctor of Geological – Mineralogical Science I. V. Bel'kov. Apatity, June 4–6, 2007*. Apatity: K&M; 2007. P. 127–129. (In Russ.)
- Serebryakov N. S. Petrology of the corundum bearing rocks of the Chupinskaya sequence of the Belomorsky Mobile Belt (by the example of the Chupinskaya segment): Summary PhD (Cand. of Geol.-Min.) thesis. Moscow: IGEM RAN; 2004. 30 p. (In Russ.)
- Starikov Yu. I. Report on the results of the detailed prospecting works for collection of raw materials, carried out in the Karelian-Kola Region (Khitostrov object) in 1978–1980. 1980. Severkvartssamotsvetovye funds. (In Russ.)
- Sutherland F., Zaw K. Editorial for special issue “Mineralogy and Geochemistry of Ruby”. *Minerals*. 2020;10(10):888. doi: 10.3390/min10100888
- Sutherland F. L., Khin Z., Meffre F., Thompson J., Goemann K., Kyaw T., Than T. N., Mhod Z. M., Harris S. I. Diversity in ruby chemistry and its inclusions: Intra and inter-continental comparisons from Myanmar and Eastern Australia. *Minerals*. 2019;9(1):28. doi: 10.3390/min9010028
- Sutherland F. L., Schwarz D., Jobbins E. A., Coenraads R. R., Webb G. Distinctive gem corundum suites from discrete basalt fields: A comparative study of Barrington, Australia, and West Pailin, Cambodia, gemfields. *J. Gemmol.* 1998;26:65–85.
- Terekhov E. N., Levitsky V. I. Geological and structural regularities of corundum mineralization location in the northern-western Belomor'ye. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka = Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 1991;6:3–13. (In Russ.)
- Vysotskii S. V., Shcheka S. A., Barkar A. V., Nechaev V. P. Primor'ye: Fragment of the East Asian sapphire-bearing belt. *Vestnik DVO RAN = Bulletin of FEB RAS*. 2003;6:57–66. (In Russ.)
- Vysotskii S. V., Ignat'ev A. V., Levitskii V. I., Nechaev V. P., Velivetskaya T. A., Yakovenko V. V. Geochemistry of stable oxygen and hydrogen isotopes in minerals and corundum-bearing rocks in Northern Karelia as an indicator of their unusual genesis. *Geochemistry International*. 2014;52(9):773–782. doi: 10.1134/S0016702914090109
- Yakovenchuk V. N., Ivanyuk G. Yu., Pakhomovskii Ya. A., Men'shikov Yu. P. Minerals of the Khibiny massif. Moscow: Zemlya; 1999. 326 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 09.02.2023; принята к публикации / accepted: 25.02.2023.  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Барнов Николай Георгиевич**

канд. геол.-мин. наук, доцент

*e-mail: barnov@inbox.ru*

### **Щипцов Владимир Владимирович**

д-р геол.-мин. наук, заведующий отделом минерального сырья ИГ КарНЦ РАН; профессор кафедры наук о Земле и геотехнологий ПетрГУ

*e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com*

### **Бубнова Татьяна Петровна**

научный сотрудник ИГ КарНЦ РАН; старший преподаватель кафедры наук о Земле и геотехнологий ПетрГУ

*e-mail: bubnova@krc.karelia.ru*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Barnov, Nikolai**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor

### **Shchiptsov, Vladimir**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Mineral Materials Department, Institute of Geology KarRC RAS; Professor PetrSU

### **Bubnova, Tatyana**

Researcher, Institute of Geology KarRC RAS; Senior Lecturer PetrSU