

УДК 553.61 + 622.7 (470.22)

## **КИАНИТОВЫЕ РУДЫ ХИЗОВААРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ)**

**В. В. Щипцов, Т. П. Бубнова, А. С. Заверткин, А. Г. Никифоров,  
Л. С. Скамницкая, П. В. Фролов**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Показана смена практической значимости кианитовых руд от природных источников алюминия до высокоглиноземистого промышленного минерала, используемого в производстве огнеупоров, противопопригарных покрытий и спецкерамических материалов. Представлена история исследований до открытия полигенных и полихронных кианитовых руд промышленного Хизоваарского кианитового поля. Хизоваарская структура Северо-Карельской зеленокаменной области стала одним из полигонов для обобщения материалов по морфогенетическим типам и технологии обогащения кианитовых руд. Дана всесторонняя характеристика основного объекта – Южной линзы, состоящей из шести крупных метаморфогенно-метасоматических и метасоматических залежей. На современном уровне Хизоваарская структура стала эталоном геодинамической модели формирования зеленокаменных поясов северокарельского типа на основе представлений террейновой тектоники с приложением результатов по геохимической типизации магматических пород и изотопно-геохронологическому изучению, полученных Е. В. Бибиковой, В. Н. Кожевниковым, А. В. Самсоновым, А. И. Слабуновым, А. А. Щипанским и др. Благодаря работам С. А. Бушмина и В. А. Глебовицкого установлены термодинамические режимы метаморфизма и разнообразные метасоматические процессы, от кислотного выщелачивания до щелочного метасоматоза. Геолого-технологическая характеристика рудного поля приведена В. В. Щипцовым с коллегами. В обобщенной форме представлены результаты многолетних исследований технологической минералогии кианитов, обогащения с использованием флотации, маркетингового анализа, проведенных в Институте геологии КарНЦ РАН. Дефицит огнеупорных материалов с использованием высокоглиноземистого сырья в различных отраслях промышленности обуславливает необходимость расширения минерально-сырьевой базы. Кианит – это материал XXI века, и потенциальная сырьевая база кианита России связывается с Карельским регионом.

**Ключевые слова:** кианит; метаморфогенные, метаморфогенно-метасоматические и метасоматические руды; кислотное выщелачивание; флотация; огнеупоры; спецкерамика; Хизоваарское кианитовое поле.

**V. V. Shchiptsov, T. P. Bubnova, A. S. Zavertkin, A. G. Nikiforov,  
L. S. Skamnitskaya, P. V. Frolov. KYANITE ORES IN THE KHIZOVAARA  
ORE FIELD, NORTH KARELIA**

A succession in the practical applications of kyanite ores from being a natural source of aluminium to a high-alumina industrial mineral used for manufacturing refractory, non-

stick and special ceramic materials is explained. All stages of research up to the discovery of polygenic and polychronous kyanite ores in the industrial Khizovaara Kyanite Field are described. The Khizovaara Structure of the North Karelian Greenstone Province has become an experimental ground for summarizing the available data on the morphogenetic types and dressing technology of kyanite ores. The main locality, known as the Yuzhnaya Lens, consisting of six large metamorphogenic-metasomatic and metasomatic bodies, is described in detail. The Khizovaara Structure now serves as the standard for the geodynamic model of the formation of greenstone belts of the North Karelian type based on our knowledge of terrain tectonics, with the application of the results on the geochemical types of igneous rocks and isotope-geochronological studies conducted by E. V. Bibikova, V. N. Kozhevnikov, A. V. Samsonov, A. I. Slabunov, A. A. Shchipansky and others. S. A. Bushmin and V. A. Glebovitsky have revealed the thermodynamic regimes of metamorphism and various metasomatic processes ranging from acid leaching to alkaline metasomatism. The ore field was described geologically, technologically and economically by V. V. Shchiptsov et al. A summary is provided of the results of long-term studies on the technological mineralogy of kyanites, their enrichment by flotation, and the related market analysis carried out at the Institute of Geology KarRC RAS. There is a shortage of refractory materials based on high-alumina raw materials in various industries. Therefore, the raw materials potential should be augmented. Kyanite is a material belonging to the 21<sup>st</sup> century. Russia's kyanite potential is largely associated with the Karelian Region.

**Key words:** kyanite; metamorphogenic, metamorphogenic-metasomatic and metasomatic ores; acid leaching; flotation; refractory materials; special ceramics; Khizovaara Kyanite Field.

## Введение

Алюминий занимает первое место среди цветных металлов по уровню производства и потребления. Исторически сложилось, что пальма первенства в алюминиевой промышленности принадлежит бокситовым рудам, из которых технологически возможно и целесообразно извлекать алюминий [Козловский, 2014]. Среди нетрадиционных видов высокоглиноземистого сырья особое место занимают кварц-глиноземистые породы (группа силлиманита: силлиманит, андалузит, кианит и муллит), метаморфогенные, первоначально обогащенные глиноземистыми минералами [Небокситовое..., 2011]. Изучение их проводилось в 30–60-е годы прошлого столетия. В нашей стране основными регионами, где известны кианитовые руды, являются Мурманская область (Кейвы – Шуурурта, Тяпшманюк, Червурта, Большой Ров и др.), Республика Карелия (Хизоваара), Урал (Абрамовское, Борисовское, россыпи Андрее-Юльевские) и Сибирь (Кяхтинское, Китойское, Базыбайское). В Мурманской области была выявлена крупнейшая по меркам мирового масштаба высокоглиноземистая неогарнейская Кейвская рудная провинция силлиманитовой группы руд с запасами более 1 млрд тонн. Правда, расширение внутреннего рынка алюминия в России за счет ввода в эксплуатацию кейвских, по составу в основном кианитовых, руд пока находится в туманной перспективе.

На повестке дня стоит вопрос об использовании кианита как промышленного минерала в производстве высококонкурентных огнеупоров и дефицитных керамических изделий. Данный минерал прочно занял нишу на мировом рынке благодаря тому, что он не имеет конкурентов по коэффициенту расширения, хотя по химическому составу не отличается от группы силлиманитовых минералов. Формула соответствует  $Al_2(SiO_4)O$  [Кривовичев, 2008].

Важным свойством кианита является его переход при обжиге в муллит. Муллит – важный компонент искусственных технических продуктов, устойчивый до температуры 1850 °С. Его свойства определяются высокой огнеупорностью, устойчивостью к большим нагрузкам и превосходной инерционностью на высокие температуры, дополнительные преимущества заключены в устойчивости к термальному шоку из-за низкого коэффициента термального расширения, удовлетворительной теплопроводности, устойчивости к химическому воздействию и абразии. Муллитовая керамика основана на химическом синтезе кварца и оксида алюминия. Производство неформованных огнеупоров как в Европе, так и в мире, в частности в сталелитейной промышленности Японии, увеличивается ежегодно [Graesberg, 1986; The economics..., 1990; Щипцов, 2005; Огородников и др., 2012].

## История изучения Хизоваарского месторождения

Хизоваарская структура является частью Северо-Карельского зеленокаменного пояса, расположенного в зоне влияния неархейских коллизионных процессов. Первые шаги по геологическому заключению о наличии кианитовых проявлений в Карелии сделаны в 1929 году. Исследования проводились по заданию Совнаркома СССР в связи с поисками руд алюминия и созданием алюминиевой промышленности для потребностей и развития самолетостроения. В Карелии несколько кианитовых проявлений выявлены В. С. Артамоновым, П. А. Борисовым, В. А. Токаревым, Л. Я. Харитоновым, Н. А. Волотовской за период 1929–1934 гг. В результате поисковых работ Хизоваарская площадь вызвала наибольший интерес с учетом материалов геологической съемки масштаба 1:100 000 и 1:25 000 (1939 г.). Первые опыты по обогащению серых кианит-кварцевых сланцев были выполнены институтом «Механобр» (руководитель В. Г. Данилов, 1939 г.), что послужило основанием для проведения геологоразведочных работ. В 1940 году Северо-Западное геологическое управление начало разведку Хизоваарского месторождения, но военное положение помешало геологам выполнить конечные задачи, а предварительно подсчитанные запасы алюминия были отнесены на тот момент к резервным. Определенным итогом работ стала статья П. А. Борисова и И. Н. Волотовской [1941], опубликованная в журнале «Советская геология» в 1941 году.

В 1949 г. институтом «Гипроникель» произведена пробная добыча кианитовых пород на участке Южная линза. В 1949–1950 гг. испытание кианитовой руды проводилось на Полевской обогатительной фабрике на Урале по флотационной схеме института «Механобр». Флотометодом в промышленных условияхработан кианитовый концентрат с содержанием  $Al_2O_3$  57–58 %. В период 1951–1953 гг. были организованы работы по доразведке Хизоваарского месторождения. Доразведка проведена на основании нового задания по кианитовым рудам с ориентацией на выпуск силумина на Надвоицком алюминиевом заводе, строительство которого завершилось в 1954 году. Результаты детальной разведки изложены в многотомном отчете, авторами которого были геологи «Севзапгеологии» Л. Г. Быстрова, А. И. Болотина, Н. А. Волотовская и Л. Е. Роговенко. Защита ТЭО кондиций и запасов промышленных категорий состоялась в Москве (протокол ВКЗ № 8578 от 14 де-

кабря 1953 г.). К забалансовым запасам были отнесены пиритизированные кианитовые руды. При проведении разведочных работ пробурены 32 скважины глубиной до 180 м и пройдены 20 разведочных канав различной протяженности. Месторождение отнесли к метаморфогенно-метасоматическому типу. Перспективный объект получил название Южная линза и включал 6 линзообразных залежей, глубина каждой более 150 м. Общие параметры от 40 до 100 м, средняя 55 м, протяженность 950 м, контакты резкие.

Для отбора технологических проб закладывались 4 опытных карьера, главным из которых был карьер № 3 (юго-западная часть залежи № 4). На обогатимость исследовались две пробы светлых кварц-кианитовых сланцев с содержанием 19,86 и 20,76 %  $Al_2O_3$  и две пробы лучистых кварц-кианитовых сланцев, содержащих 33,24 и 38,0 %  $Al_2O_3$ . В процессе этих исследований разработана схема обогащения, включающая измельчение до 50% класса – 0,074 мм, обесшламливание по классу 30 мкм, удаление сульфидов в голове процесса с использованием бутилового ксантогената и флотацию кианита в содовой среде олеиновой кислотой, а также сделано заключение о хорошей обогатимости светлых и лучистых разновидностей кианитовых руд месторождения [Данилов, 1957].

Затем длительное время Южная линза не изучалась. С тех пор проявление получило статус месторождения, а кианит привлек внимание возможностью его использования в огнеупорной, керамической и авиационной промышленности. Этот объект среди всех российских наиболее подготовлен к освоению. При сравнительных испытаниях в ВИАМ (Москва) установлено, что керамические формы из карельского кианита пригодны после обжига для особо тонкого литья турбинных лопаток самолетных и ракетных двигателей. При температуре 1060° обладают достаточной прочностью, превосходя в три раза прочность подобных материалов, где использовался украинский кианит-силлиманит [Демонис и др., 1990; Карпович и др., 1995]. Работа проводилась по заданию Министерства авиационной промышленности СССР. По понятным причинам исследования прекратились.

Попытка вовлечения месторождения в эксплуатацию была предпринята ООО «ИМК», созданным в 1993 году (один из авторов входил в состав учредителей). По договору с ИМК в 1997 г. норвежская компания Minpro Strassa провела испытания кианита данного месторождения, чтобы определить рыночный уро-

вень продукта. Был получен концентрат с содержанием 60,0 %  $Al_2O_3$ ; 37,1 %  $SiO_2$ ; 0,27 %  $Fe_2O_3 + FeO$ ; 1,4 %  $TiO_2$ ; 0,05 % S. В испытательной лаборатории материалов норвежской компании Elkem проводились тесты на огнеупоры, давшие положительный результат. Опытная добыча кианитовой руды в пилотном карьере № 3 Южной линзы Хизоваарского месторождения осуществлена в 1998 г. силами старательской артели «Карелия» (директор А. Я. Беляев). В рамках этих работ на опытно-промышленной установке ОАО «Апатит» (г. Апатиты) наработана опытная партия кианитового концентрата объемом 23 тонны для последующих технологических испытаний. Однако в 1999 г. работы были прекращены ввиду отсутствия финансирования. Предварительная технологическая оценка кианитового концентрата Хизоваарского месторождения показала, что на его основе могут быть получены противопопригарные материалы для точного литья в авиационной промышленности. ВНИИлитмаш разработал ТУ на противопопригарные покрытия из кианита и технологию их изготовления, ВИАМ – ТУ на кианитовый концентрат для турбинных лопаток, которые были испытаны на заводе «Рыбинские моторы».

Спустя несколько лет ОАО «Гранит» получило лицензию на реализацию инвестиционного проекта «Кианит». Сфера деятельности компании заключалась в выборе инвестиционных объектов, подготовке на их базе проектов по созданию предприятий, производящих нерудные материалы, управлении проектами и привлечении инвестиций для их финансирования. Общая задача информировать потенциальных инвесторов о перспективных планах компании по реализации инвестиционного проекта на базе Хизоваарского месторождения была осуществлена, но реальных шагов не последовало. Таким образом, собственник в конце концов был лишен права обладания лицензией.

Хизоваарская структура Северо-Карельской зеленокаменной области стала одним из полигонов для обобщения материалов по морфогенетическим типам и технологии обогащения кианитовых руд Карельского региона в рамках интеграционного проекта «Развитие минерально-сырьевой базы России: освоение новых источников высокоглиноземистого сырья (минералы группы силлиманита и пирофиллита, каолины, золы и др.)», руководитель проекта академик В. А. Коротеев [Проблемы..., 2010; Небокситовое..., 2011; Огородников и др., 2012, 2013]. Исследования проводились при финансовой поддержке гранта 09-05-12033 оф

и проекта УрО и ДВО РАН 2009–2011 гг., а также в рамках госбюджетных тем ИГГ УрО РАН, ГИ КНЦ РАН и ИГ КарНЦ РАН. От Института геологии КарНЦ РАН участниками проекта были В. В. Щипцов, Л. С. Скамницкая и Т. П. Бубнова.

Итог исследований показан в таблице 1, в которой приводится характеристика объекта Южная линза (рис. 1, 2 и 3).

### **Геология Хизоваарского рудного поля**

Геологическое изучение Хизоваарского рудного поля во многом связано с открытием в нем месторождения кианитовых руд, что было описано П. А. Борисовым и Н. А. Волотовской [1941]. Разные варианты его строения и стратиграфии предложены С. И. Рыбаковым, В. Н. Кожевниковым и другими [Рыбаков, Мельянцева, 1986; Кожевников, 2000; Кожевников и др., 2005]. В этих работах рассматривается геология, последовательность формирования структур, геохимия вулканитов, осадков и некоторых метасоматических процессов. Важным этапом исследований стало обоснование геодинамической модели формирования зеленокаменных поясов северокарельского типа на основе представлений террейновой тектоники с приложением результатов по геохимической типизации магматических пород и изотопно-геохронологическому изучению, полученных Е. В. Бибиковой, В. Н. Кожевниковым, А. В. Самсоновым, А. И. Слабуновым, А. А. Щипанским и другими [Самсонов и др., 2000; Бибикова и др., 2003; Shchipansky et al., 2004 и др.], термодинамическим режимам метаморфизма и разнообразным метасоматическим процессам, детально изученным С. А. Бушминым и В. А. Глебовицким [Бушмин, 1978, 1989; Глебовицкий, Бушмин, 1983; Bushmin, Glebovitsky, 2016]. Геолого-технологическая характеристика рудного поля представлена В. В. Щипцовым с коллегами [Щипцов и др., 1988; Геологическое..., 1990; Огородников и др., 2013; Коротеев и др., 2015].

Хизоваарская структура представляет собой фрагмент Северо-Карельского зеленокаменного пояса, а хизоваарская свита рассматривается в составе тикшеозерской серии лопия [Материалы..., 1982]. В масштабе этой структуры в ее северной части сформировались кианитовые руды, составляющие несколько крупных проявлений, слагающих на площади более 5 кв. км Хизоваарское кианитовое поле. В границах данной площади осуществлены детальные работы по комплексному геологическому исследованию, что положено в основу геоло-

Таблица 1. Характеристика кианитовых руд Хизоваарского месторождения (Южная линза) [Щипцов и др., 1988; Голованов, Щипцов, 2006]

Table 1. Characteristics of kyanite ores from the Khizovaara deposit (Yuzhnaya Lens) [Shchiptsov et al., 1988; Golovanov, Shchiptsov, 2006]

1	Название месторождения Name of deposit	Хизоваарское месторождение кианитовых руд (Лоухский район, Северная Карелия) Khizovaara kyanite ore deposit, Loukhi District, North Karelia
2	Местоположение месторождения Location of deposit	Южная линза – в 12 км юго-восточнее ж/д станции Еловая, связано грунтовой дорогой Yuzhnaya Lens, 12 km south-east of Yelovaya Railway Station, connected by an earth road
3	Количество запасов промышленных категорий Amount of reserves, industrial categories	В+С, 2881 тыс. т (руда) P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> 16378 тыс. т (руда) В+С, 2881 thousand tons (ore) P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> 16378 thousand tons (ore)
4	Дата и место защиты ТЭО кондиций и запасов промышленных категорий Date and venue of reporting the results of a feasibility study on conditions and reserves of industrial categories	Протокол ВКЗ № 8578 от 14 декабря 1953 г. (Москва) VKZ Protocol # 8578 of 14 December, 1953, Moscow
5	Перечень документации по месторождению: • ТЭО List of documents on the deposit: • feasibility study	Отчет о детальной разведке с подсчетом запасов. 1954 г. Геолфонд, Москва Report on detailed prospecting with estimation of reserves. 1954. Geolfond, Moscow
6	Инфраструктура месторождения • электроэнергия  • газ • ж/д • автодороги • водоснабжение Deposit infrastructure • Electrical power  • gas • railway • highway • water supply	ЛЭП по прямой около 8 км (если модульную фабрику размещать близ карьера, то используются дизель-агрегаты) Привозной 12 км от карьера Объект связан с грунтовой дорогой В 500–1000 м береговая линия озера  ~8 km long electrical power line (if a modulus assembly is installed near the quarry, then diesel aggregates are used) Supplied from other areas 12 km from the quarry There is an earth road leading to the deposit Lake shoreline is 500–1000 m away
7	Геологический тип месторождения Geological type of deposit	Метаморфогенно-метасоматический Metamorphogenetic-metasomatic
8	Рудные тела • условия залегания • форма • размеры • контакты с вмещающими породами Ore bodies • mode of occurrence • shape • size • contacts with host rocks	На участке «Южная линза» 6 залежей, глубина более 150 м. Мощность наносов от 1 до 6 м Линзообразные От 40 до 100 м, средняя 55 м, протяженность 950 м Резкие At South Lens prospect 6 bodies, depth is over 150 m. Detritus is 1–6 m thick Lenticular 40 to 100 m, average 55 m, length 950 m Sharp
9	Минеральный состав, в % Mineral composition, %	2 типа руд: первый тип – кварц 70–85 %, кианит 10–25 % (главные); мусковит, плагиоклаз, биотит, графит, тальк (второстепенные); пирит 0–10 %, пирротин, магнетит (рудные); рутил, апатит, сфен, гранат (акцессорные); второй тип – кварц 50–60 %, кианит 10–40 % (главные); мусковит, графит (второстепенные); пирит 0–10 %, пирротин, арсенопирит (рудные); рутил (акцессорные) 2 types of ores: in type I quartz makes up 70–85 % and kyanite 10–25 % (major); muscovite, plagioclase, biotite, graphite, talc (minor); pyrite 0–10 %, pyrrhotite, magnetite (ore); rutile, apatite, sphene, garnet (accessory); in type II quartz makes up 50–60 % and kyanite 10–40 % (major); muscovite, graphite (minor); pyrite 0–10 %, pyrrhotite, arsenopyrite (ore); rutile (accessory)



Окончание табл. 1

Table 1 (continued)

10	Химический состав руд Chemical composition of ores	Средний состав кианитсодержащих руд, вес. %: SiO <sub>2</sub> 69,90; TiO <sub>2</sub> 0,57; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 20,36; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 4,16; FeO 0,43; MnO 0,01; MgO 0,31; CaO 0,63; Na <sub>2</sub> O 0,47; K <sub>2</sub> O 0,14 Average composition of kyanite-bearing ores, wt. %: SiO <sub>2</sub> 69.90; TiO <sub>2</sub> 0.57; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 20.36; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 4.16; FeO 0.43; MnO 0.01; MgO 0.31; CaO 0.63; Na <sub>2</sub> O 0.47; K <sub>2</sub> O 0.14
11	Геолого-минералогические сорта руд Geologo-mineralogical ore grades	Светло-серые с игольчатым кианитом (91 % всего объема) и серые до стально-серых с лучистым (сноповидным радиально-лучистым) кианитом Light-grey with acicular kyanite (91 % of total volume) and grey to steel-coloured-grey with radiated (sheaf-like radiated) kyanite
12	Технологические сорта руд Technological ore grades	Светло-серые игольчатые кварц-кианитовые и серые лучистые кварц-кианитовые Light-grey acicular quartz-kyanite and grey radiated quartz-kyanitic
13	Способы отработки  <ul style="list-style-type: none"> <li>• взрыв, экскаваторный</li> <li>• коэффициент вскрыши т/т</li> <li>• % разубоживания для выбранного способа добычи</li> </ul> Quarrying method  <ul style="list-style-type: none"> <li>• (blast, excavator)</li> <li>• overburden coefficient t/t</li> <li>• % impoverishment for the quarrying method chosen</li> </ul>	Руда по крепости (шкала буримости) – VIII категория. Отработка целесообразна многоступным карьером с оставлением целика на опасных участках. Гидрогеологические условия относительно усложненные Взрывной 1,85 10  Ore strength (drillability scale) – category VIII. Multi-bench quarrying with a pillar left in unreliable places is recommended. Relatively complex hydrogeological conditions. Blasting 1.85 10
14	Способ подготовки к обогащению (размер фракции руды на входе и выходе рудоподготовки) Pre-dressing method (ore dressing input and output ore fraction size)	Средний размер зерен кианита 3,3 мм, преобладающий размер зерен кианита 0,5–7 мм, класс раскрытия кианита 0,16–0,1 мм Average kyanite grain size is 3.3 mm, predominant kyanite grain size is 0.5–7 mm, kyanite opening class is 0.16–0.1 mm
15	Способ обогащения Dressing method	Флотация Flotation
16	Коэффициент извлечения кианита по принятой для месторождения схеме обогащения Kyanite extraction coefficient consistent with the dressing scheme accepted for the deposit	Извлечение кианита в концентрат Extraction of kyanite to concentrate – 65–70 %
17	Виды готовой продукции <ul style="list-style-type: none"> <li>• основной концентрат</li> <li>• попутные концентраты</li> </ul> Types of finished products <ul style="list-style-type: none"> <li>• basic concentrate</li> <li>• associated concentrates</li> </ul>	Кианитовый Кварцевый и пиритовый  Kyanitic Quartz and pyritic
18	Характеристика по видам готовой продукции <ul style="list-style-type: none"> <li>• химический состав</li> <li>• минеральный состав</li> <li>• фракционный состав</li> <li>• влажность</li> <li>• объемный вес</li> </ul> Characteristics of the types of finished products <ul style="list-style-type: none"> <li>• chemical composition</li> <li>• mineral composition</li> <li>• fractional composition</li> <li>• moisture content</li> <li>• volume weight</li> </ul>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> не менее 55 %, SiO <sub>2</sub> не менее 40 %, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO не более 0,5 %, TiO <sub>2</sub> не более 1,20 %, F не более 0,1 %, S не более 0,3 % Кианит не менее 90 %, кварц 5–10 %, слюда не более 1,5 %, полевой шпат и прочие менее 0,5 % Гранулометрический состав менее 315 μm Не более 1 % 3,6 г/см <sup>3</sup>  Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> at least 55 %, SiO <sub>2</sub> at least 40 %, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO no more than 0.5 %, TiO <sub>2</sub> no more than 1.20 %, F no more than 0.1 %, S no more than 0.3 %; Kyanite at least 90 %, quartz 5–10 %, mica no more than 1.5 %, feldspar and others less than 0.5 % Particle size composition is less than 315 μm No more than 1 % 3.6 g/cm <sup>3</sup>



Рис. 1. Юго-восточный борт опытного карьера № 3 (залежь № 4, Южная линза)

Fig. 1. Southeastern flank of experimental quarry # 3 (Body 4, Yuzhnaya Lens)

гической карты кианитового поля в масштабе 1:10 000 (рис. 2) [Щипцов и др., 1988].

В геологическом строении рассматриваемой площади участвуют комплексы осадочно-вулканогенных и осадочных пород, представленные метаморфизованными туффидами андезитов и дацитов, граувакками, метапесчаниками, кремнистыми туффидами, хемогенными кварцитами и другими разновидностями, связанных в той или иной степени с неоархейским вулканизмом. К реперам геологических процессов относятся обособленные вулканогенные формации. Устанавливается следующая последовательность с северо-запада на юго-восток по разрезу: нижняя коматиит-базальтовая, дацит-андезитовая, дацит-риолитовая и верхняя коматиит-базальтовая формации. Метабазальты соответствуют толеитовым сериям, метаандезиты – образованиям промежуточных между толеитовой и известково-щелочной сериями, а метадациты и метариолиты тяготеют к известково-щелочной ветви. Подобные вещественные соотношения иллюстрируют гетерогенность сопряженных комплексов, что подчеркивается преобладанием в одном вулканическом цикле толеитовых серий в ниж-

них частях разреза со сменой в верхних на известково-щелочные. К. Condie [1982] объяснял это явление особенной закономерностью архейских зеленокаменных поясов.

В практическом отношении особое значение имеют два горизонта глиноземистых сланцев. Первый (нижний) высокоглиноземистый горизонт пространственно связан с андезитами и туффидами андезитового состава. Несмотря на то что в докембрии не могло быть полнопрофильных кор латеритного выветривания, здесь устанавливаются по косвенным признакам наземные коры выветривания, представленные химически дифференцированными кластогенными кварцито-метапесчаниками Хизоваарского рудного поля, а глиноземистые минералы являются дериватами каолинита [Щипцов и др., 1988]. Метаморфизм условий высоких давлений и средних температур оказал влияние на формирование химически дифференцированных метаморфических пород, в значительной степени метасоматически измененных и превращенных в такие локальные комплексы, как хизовариты [Глебовицкий, Бушмин, 1983]. Существование коры выветривания в андезитовой части разреза позволяет говорить о не-

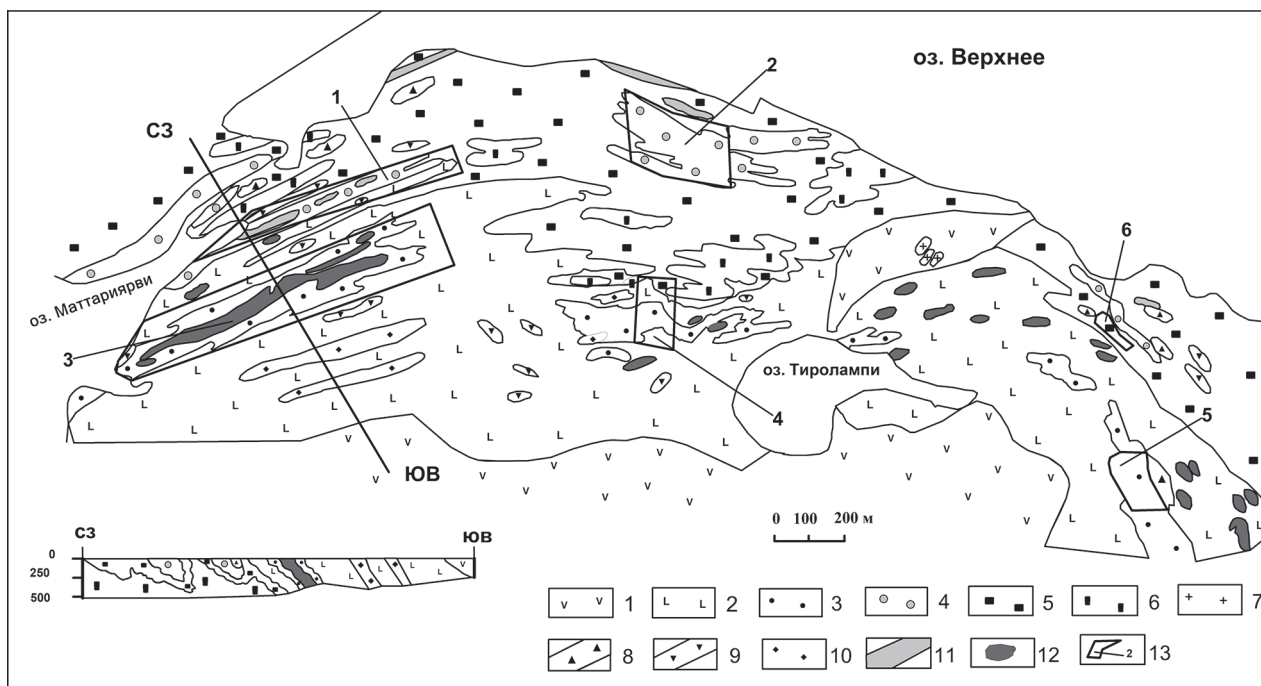


Рис. 2. Геологическая карта Хизоваарского кианитового поля с использованием основы [Щипцов и др., 1988]:

1 – metabasalts; 2 – осадочно-вулканогенные породы дацитового и риодацитового составов; 3 – верхний высокоглиноземистый горизонт; 4 – нижний высокоглиноземистый горизонт; 5 – осадочно-вулканогенные породы андезитового и дацит-андезитового составов; 6 – метаандезиты. Дайковые комплексы: гранит (7); риодациты и дациты (8); габбро-диабазы (9); высокомагнезиальные габбро (10); габбро-амфиболиты (11); метасоматиты: силициты (12); 13 – номера участков: Северная линза (1), Восточная линза (2); Южная линза (3), Фукситовый (4), Восточный – 2 (5); Междозерное (6)

Fig. 2. Geological map of the Khizovaara Kyanite Field based on [Shchiptsov et al., 1988]:

1 – metabasalts; 2 – sedimentary-volcanic rocks of dacite and rhyodacite composition; 3 – upper high-alumina horizon; 4 – lower high-alumina horizon; 5 – sedimentary-volcanic rocks of andesite and dacite-andesite composition; 6 – metaandesites. Dike complexes: granite (7); rhyodacites and dacites (8); gabbro-diabases (9); high-Mg gabbro (10); gabbro-amphibolites (11); metasomatic rocks: silicites (12); 13 – prospect number: Severnaya Lens (1), Vostocnaya Lens (2); Yuznaya Lens (3), Fuchsite (4), Vostocnaya – 2 (5); Mezhozernoye (6)

котором перерыве между периодами андезитового и дацитового вулканизма.

Второй (верхний) высокоглиноземистый продуктивный кианитовый горизонт выделен в составе грауваккового ряда. Источником высокоглиноземистых минералов являются алюмокремнистые осадочные породы, значительная часть которых может представлять плохо отсортированный обломочный материал ниже лежащих пород дацит-андезитовой формации. Андезиты, подвергаясь первоначальному экзогенному воздействию, претерпели последовательную эндогенную переработку и явились источником накопления глинозема (рис. 2).

Полученные данные при исследовании особенностей формирования кианитовых руд Хизоваарского поля подтверждают, что разновременные метасоматические процессы могут пространственно совмещаться. Метасоматоз играет важнейшую роль в становлении минеральных систем, потенциально определяемых на промышленный кианит, на чистоту которого

оказывает влияние природная «лаборатория». В природе кианит может образовываться различными путями. Месторождения и проявления Хизоваарского рудного поля относятся к формации регионально-метаморфических кианитовых сланцев и ассоциирующей с ними формации алюмокремниевых метасоматитов, обусловленной кислотным выщелачиванием при процессах постмигматитового метасоматоза [Щипцов и др., 1988; Огородников и др., 2012; Коротеев и др., 2015].

К настоящему времени фактические материалы позволяют говорить о многоэтапном проявлении регионального метаморфизма. Региональный метаморфизм и ультраметаморфизм неорархейских пород сопровождается формированием метаморфогенных рудообразующих систем. Метаморфизм раннего этапа (из документируемых) проявлен в условиях гранат-кианит-биотит-ортоклазовой субфации с переходом к ставролит-жедрит-кианитовой и гранат-кианит-биотит-мусковитовой суб-



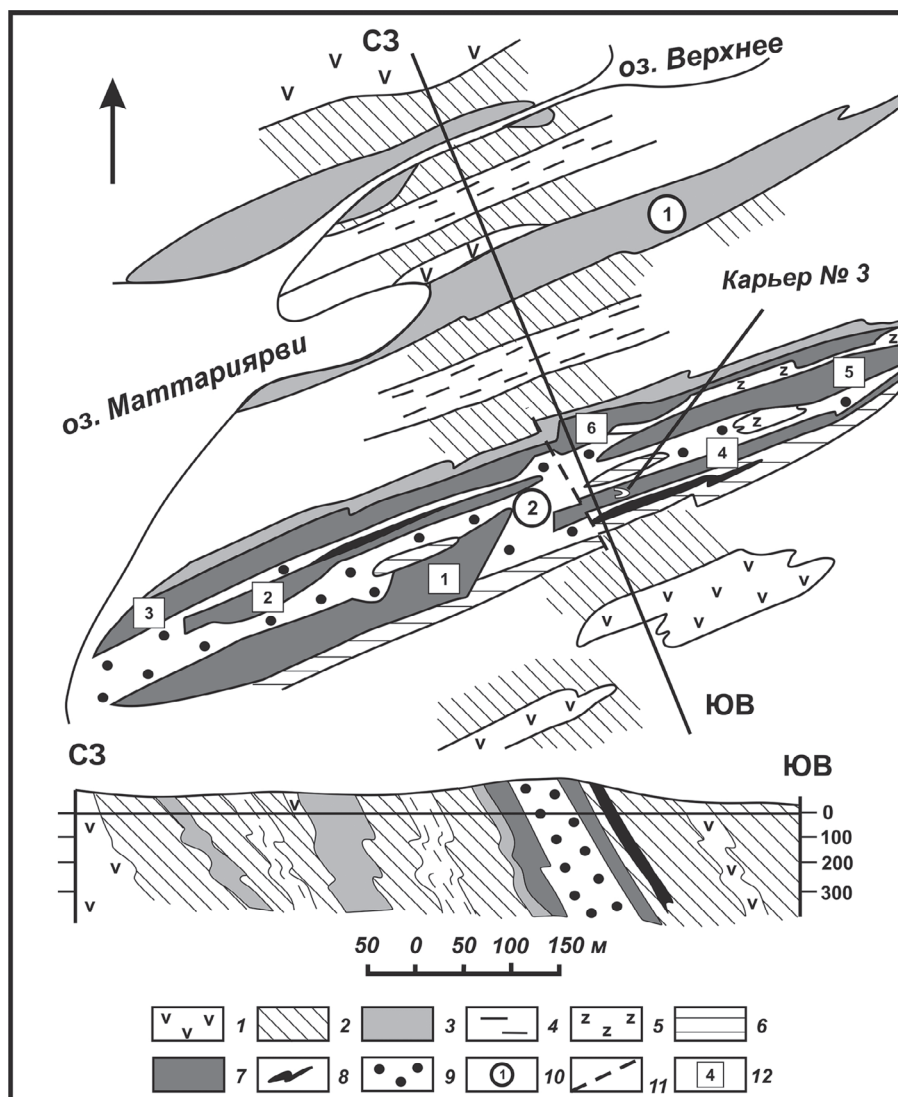


Рис. 3. Геологическая схема участка Маттариярви:

1 – амфиболиты; 2 – амфибол-биотитовые сланцы; 3 – кyanит-биотитовые гнейсы (первый высокоглиноземистый горизонт); 4 – слюдястые сланцы; 5 – кyanит-полевошпатовые кварциты; 6 – амфибол-кyanит-ставролитовые метасоматиты; 7 – кyanитовые кварциты (второй высокоглиноземистый горизонт); 8 – графит-кyanитовые кварциты; 9 – мусковитизированные кyanитовые кварциты; 10 – Северная линза (1); Южная линза (2); 11 – разрывные нарушения; 12 – номер залежи Южной линзы

Fig. 3. Geological scheme of the Mettarijärvi prospect:

1 – amphibolites; 2 – amphibole-biotite schists; 3 – kyanite-biotite gneisses (high-alumina horizon I); 4 – mica schists; 5 – kyanite-feldspar quartzites; 6 – amphibole-kyanite-staurolite metasomatic rocks; 7 – kyanitic quartzites (high-alumina horizon II); 8 – graphite-kyanite quartzites; 9 – muscovitized kyanite quartzites; 10 – Severnaya Lens (1); Yuzhnaya (2); 11 – faulting; 12 – Yuzhnaya Lens body number

фациям кyanит-силлиманитовой фациальной серии  $B_2$ , по В. А. Глебовицкому [1973], когда в исходных алюмосиликатных породах кyanит формируется как один из главных породообразующих минералов. В благоприятной обстановке (при содержании глинозема в первичной породе более 24 %) могут формироваться значительные скопления кyanита, которые при

достаточной мощности и протяженности оцениваются как перспективные промышленные.

В метаморфических породах данной структуры развиты кислые и основные метасоматиты при средних температурах (450–600 °C) и высоких давлениях (5–8 кбар), определенные В. А. Глебовицким и С. А. Бушминым как хизовариты – глубинные аналоги скелей [Глебовицкий,

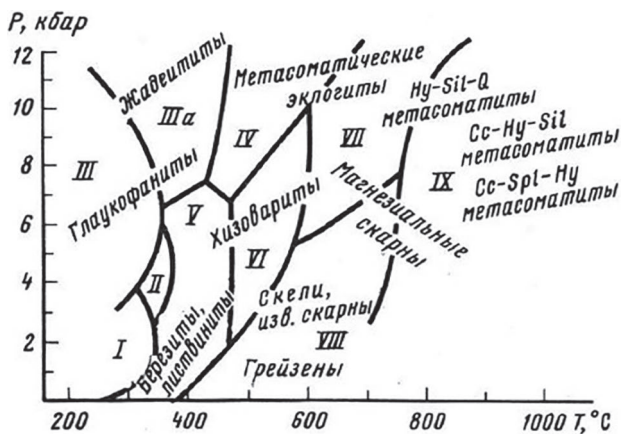


Рис. 4. Схема фаций и условия образования главных формационных типов метасоматитов, связанных с региональным метаморфизмом, по: [Бушмин, 1989; Бушмин, Глебовицкий, 2008].

Фации метаморфизма: I – цеолитовая; II – пумпелиит-актинолитовая; III – глаукофан-лавсонитовая; IIIa – глаукофан-гранатовая; IV – кварц-цоизит-кианитовая; V – зеленосланцевая; VI – эпидот-амфиболитовая; VII – куммингтонит-амфиболитовая; VIII – альмандин-амфиболитовая; IX – гранулитовая

Fig. 4. Scheme of facies and the conditions of formation of the major facies types of metasomatic rocks produced by regional metamorphism, after: [Bushmin, 1989; Bushmin, Glebovitsky, 2008].

Metamorphic facies: I – zeolitic; II – pumpellyitic-actinolitic; III – glaucophane-lawsonitic; IIIa – glaucophane-garnet; IV – quartz-zoisitic-kyanitic; V – greenschist; VI – epidote-amphibolitic; VII – cummingtonitic-amphibolitic; VIII – almandine-amphibolitic; IX – granulitic

Бушмин, 1983; Бушмин, 1989; Бушмин, Глебовицкий, 2008] (рис. 4). К хизоваритам относятся глубинные метасоматиты роговообманково-гранат-ставролит-кианит-кварцевого и роговообманково-ставролит-гранатового состава и кислотные метасоматиты, содержащие избыточный кремнезем с обогащенным алюминием.

Кислотные метасоматиты Хизоваарской структуры на определенных площадях формировались в условиях кварц-кианитовой

и кварц-мусковитовой фаций метасоматоза средних температур и повышенных давлений с высокой активностью летучих, что приводит к устойчивости других минералов, например, пирита и турмалина. Метасоматиты являются следствием подвижности компонентов и изменения минеральной системы.

На Хизоваарском рудном поле локализованы три типа природных руд с промышленным кианитом – метаморфический, метаморфогенно-метасоматический и метасоматический, каждый из которых имеет свои морфогенетические особенности (рис. 5). Они различаются по минеральному, гранулярному составу и характеру сростаний. Возможно пространственное совмещение разновременных метасоматических процессов. В частности, образование радиально-лучистой разновидности кианита в руде связано с наложенным метасоматизмом той же фации щелочности-кислотности.

Таким образом, три типа выделенных руд зависят от термодинамических условий их формирования. Метаморфогенно-метасоматический тип занимает промежуточное положение, при котором минеральные агрегаты формируются с помощью неполного метасоматического механизма, сохраняя частично признаки метаморфических пород. В полигенной и полихронной системе Хизоваарского рудного поля происходило формирование метаморфического и метасоматического кианита [Щипцов, 2018; Nikiforov, Bubnova, 2018].

Нами выделены три активных фактора контроля оруденения: литостратиграфический, метаморфический (метаморфогенно-метасоматический) и структурный [Щипцов и др., 1988; Огородников и др., 2012; Shchiptsov, Nikiforov, 2016].

Структурный план Хизоваарского кианитового поля аналогичен ряду полей мусковитовых пегматитов Северной Карелии. Л. Л. Гродницкий с коллегами [1985] указали, что локальный

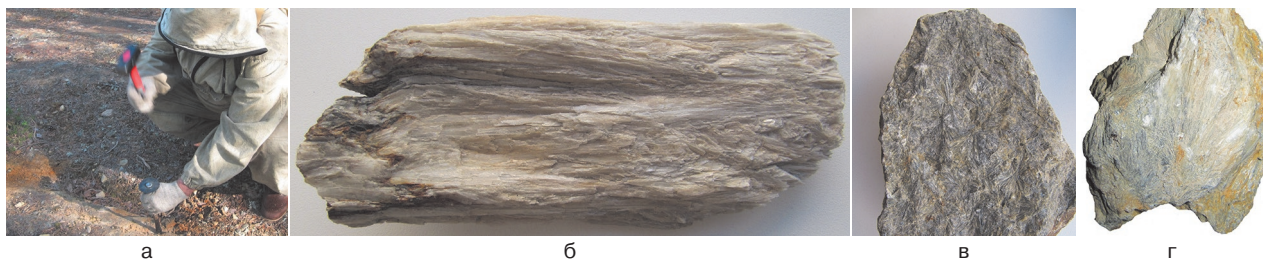


Рис. 5. а) кианитовый сланец (Северная линза); б) игольчатый кианит (Южная линза); в) радиально-лучистый кианит (Южная линза); г) сноповидно-игольчатый кианит (Южная линза)

Fig. 5. а) kyanite schist (Severnaya Lens); б) acicular kyanite (Yuzhnaya Lens); в) radiated kyanite (Yuzhnaya Lens); г) sheaf-like-acicular kyanite (Yuzhnaya Lens)

поисковый структурный критерий для мусковитовых пегматитов представляет собой сопряжение в пространстве двух возрастных групп структур – ранних субширотных с наклонными осевыми поверхностями и поздних субмеридиональных (и северо-западных) с преимущественно крутыми осевыми поверхностями.

Главная особенность Хизоваарского кианитового поля выражается в сочетании ранней Верхнеозерской синформы с осевой поверхностью субширотного простираения при относительно пологих углах погружения и наложенной Хизоваарской синформой с крутопадающими осевыми плоскостями субмеридионального простираения [Щипцов и др., 1988].

Рудные кислотные метасоматиты участка Южная линза обнаруживают определенную пространственную связь со структурами субширотного простираения и залегают согласно плоскостям сланцеватости. Образование метаморфогенных кианитовых тел оторвано значительным промежутком времени от более поздней стадии кислотного выщелачивания. Нашими исследованиями показано, что на участках Фукситовый и Восточный-2 рудные проявления тяготеют к развитию более молодых структур, синхронных молодой Хизоваарской синформе. В этих зонах широко развит наложенный кливаж параллельно осевым плоскостям молодых складчатых структур. Например, на участке Фукситовый образуется наложенная сланцеватость северо-западного простираения. Кварц-кианитовые ассоциации прерывисто-прожилкового типа распространены в узкой зоне наложенной складчатости и используют как новые плоскости, так и деформируемые плоскости главной структуры. Формирование субмеридиональных структур на Хизоваарской площади относится к свекофеннскому этапу, что еще раз подчеркивает аналогию

с пегматитовой формацией [Щипцов и др., 1988; Щипцов, 2011; Shchiptsov, 2014]. Результаты U-Pb датирования по цирконам на участке Фукситовый дали возраст  $1800 \pm 7$  млн лет [Сергеев, Лобач-Жученко, 1993].

### Результаты минералого-технологических исследований

К главным факторам, обуславливающим возникновение глиноземистых месторождений и проявлений, относится, наряду с концентрацией вещества, многоэтапность их преобразования, сопровождающаяся концентрацией полезного компонента, выделение его в соответствующей минеральной форме с определенными физическими свойствами, размерами кристаллов, чистотой кристаллической решетки и т. д. [Небокситовое..., 2011; Коротеев и др., 2015].

Исследования вещественного состава и технологических свойств кианитовых руд Хизоваарского месторождения проводились в разные годы сотрудниками разных учреждений – института «Механобр», Института геологии КарНЦ РАН, Горного института КНЦ РАН и других организаций.

В процессе этих исследований выявлены генетические типы руд, отличающиеся по вещественному, гранулярному составу и характеру кристаллизации кианита. Получены данные о том, что сумма примесей в кианите, исключая гигроскопическую влажность и потери при прокаливании 1,72–2,47 %, приходится на долю  $TiO_2$  и  $Fe_2O_3$ . Значительное количество связано с микроскопическими пойкилобластами рутила, плагиоклаза и мельчайших зерен пирита, которые не удаляются при обогащении. Микроминеральные включения в кианите изображены на рис. 6.

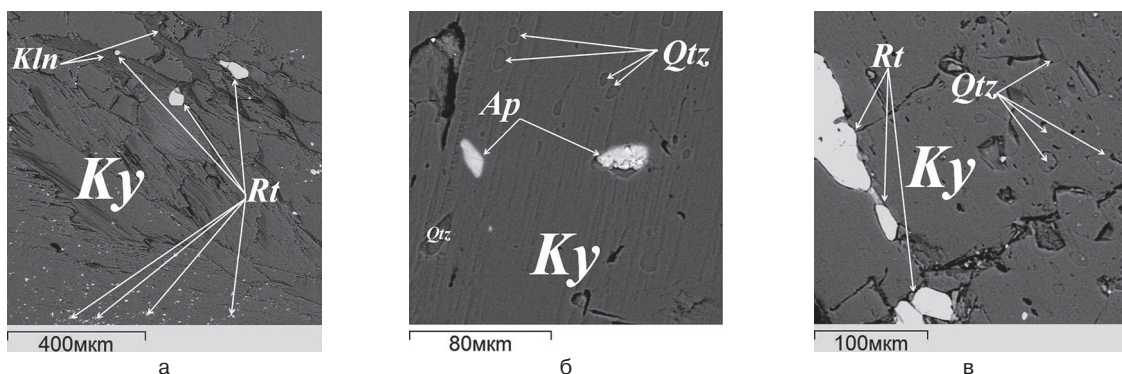


Рис. 6. Микроминеральные включения в кианите Южной (а), Северной (б) и Восточной (в) линзы: Ky – кианит; Rt – рутил; Zrn – циркон; Kln – каолинит; Qtz – кварц. Изображение СЭМ VEGA II LSH

Fig. 6. Micromineral inclusions in kyanite of the Yuznaya (a), Severnaya (б) and Vostochnaya (в) Lenses: Ky – kyanite; Rt – rutile; Zrn – zircon; Kln – kaolinite; Qtz – Quartz. Image SAM VEGA II LSH



Анализ взаимосвязи вещественного состава и технологических показателей обогащения кианитовых руд указывает на отсутствие однозначной связи между содержанием полезного компонента в руде и его технологическими показателями: концентраты светло-серых руд с игольчатым кианитом содержат 55,5–56,0 %  $Al_2O_3$ , концентраты серых руд с радиально-лучистым кианитом – 58 %.

В зернах кианита присутствуют валентно и координационно ненасыщенные атомы алюминия, размещение которых для кианита трех разновидностей отличается разной степенью упорядочения. На рис. 7 показано, что наиболее высокочастотная часть спектра близка у кианитов светло-серой и темно-серой окраски, голубой кианит по ИК-спектру имеет существенное отличие в силикатной части, структурирован и обладает более совершенной упаковкой [Щипцов и др., 1988].

Геохимия редких элементов кианита достаточно выдержана для всех анализируемых образцов. На рис. 8 приведены типовые мультиэлементные диаграммы для кианитов ряда изученных объектов. Уровень концентрации

большинства элементов в сравниваемых кианитах отличается не более чем на порядок. При этом топология спектров распределения редких элементов имеет схожий характер, с отчетливо проявленными максимумами по Th, Hf, Tb и Tm: обр. 3042 – кианит из кианит-гранат-амфибол-мусковит-полевошпатовой породы, участок Межозерный; обр. 3043 – кианит-кварц-мусковитовый сланец, Фукситовый участок; обр. 237/86 – кианит из кианит-двухслюдяных сланцев, Северная линза; обр. 181 – кианит из кианит-гранатовых сланцев, Высота-181 [Щипцов, 2011].

Микронзондовые исследования различных морфологических типов кианита в руде показали, что составы игольчатых и лучистых кианитов не отличаются от стехиометрического: содержание  $Al_2O_3$  – 63,45–63,81 %,  $SiO_2$  – 36,19–36,36 %. Встречаются также выделения кианита с пониженным содержанием алюминия. Среди радиально-лучистых разновидностей кианитов повсеместно присутствуют реликты каолинита, что косвенно подтверждает гипотезу Н. А. Волотовской [Волотовская, Жиров, 1948] и данные поздних исследований

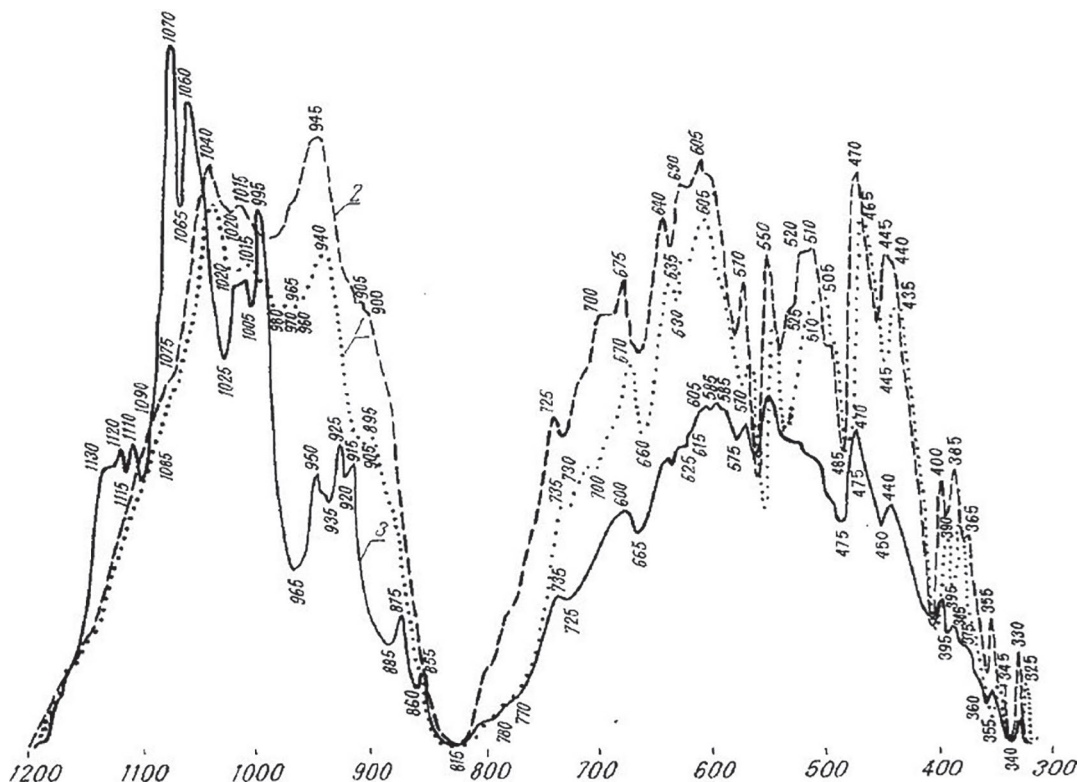


Рис. 7. ИК-спектры кианита:

1 – серого (игольчатый, Южная линза, карьер № 3); 2 – темно-серого (радиально-лучистый, Южная линза, карьер № 3); 3 – голубого цвета (таблитчатый, Фукситовый участок)

Fig. 7. IR kyanite spectra:

1 – grey (acicular, Yuzhnaya Lens, quarry # 3); 2 – dark-grey (radiated, Yuzhnaya Lens, quarry # 3); 3 – sky-blue colour (tabular, Fuchsite prospect)



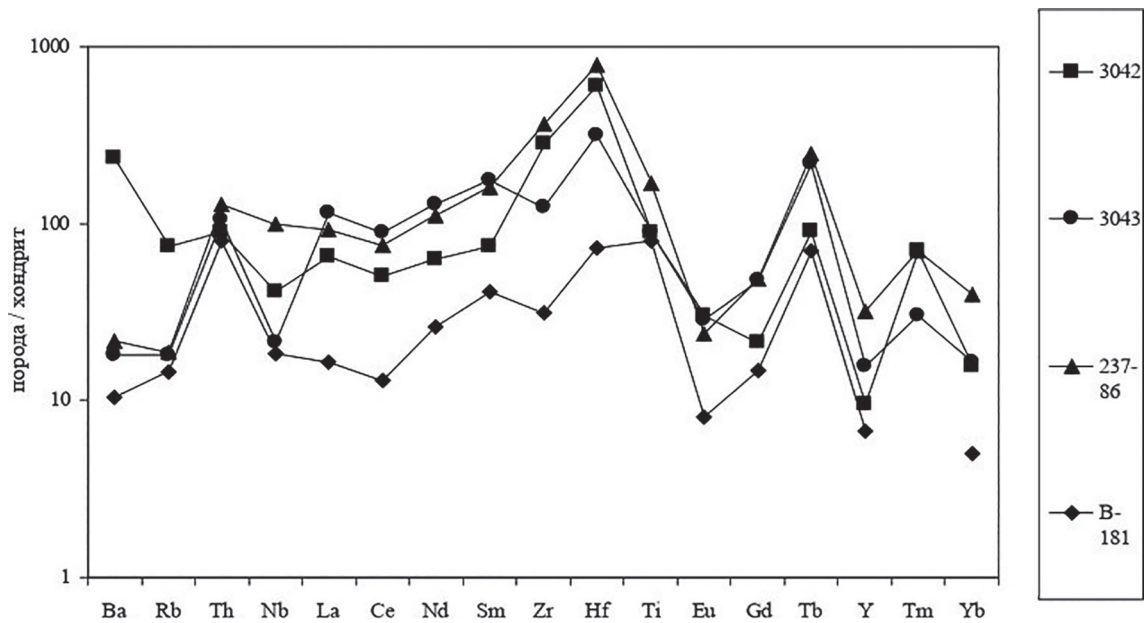


Рис. 8. Мультиэлементные диаграммы для кянитов Хизоваарского рудного поля. Нормализовано по хондриту [Thompson, 1982]. Содержание редких элементов определено в аналитической лаборатории ИГ КарНЦ РАН методом ICP-MS в соответствии с методикой [Светов и др., 2015]

Fig. 8. Multi-element diagrams for the Khizovaara Ore Field kyanites. Chondrite-normalized [Thompson, 1982]. Trace elements were identified in the Analytical Laboratory at the IG KarRC, RAS, by the ICP-MS method in a regime [Svetov et al., 2015]

[Скамницкая и др., 2008] о генетической связи кянита с исходной глинистой толщей (рис. 9).

### Технологии обогащения кянитовых руд

В обогащении кянитовых руд пока наибольшее значение имеет флотация, применяемая самостоятельно либо в комбинации с магнитной сепарацией или гравитацией [Данилов,

1957; Алексеев, 1976, 1980; Каменева, Скамницкая, 2003].

Достаточно детально исследования по технологии обогащения руд Хизоваарского кянитового поля раскрыты в двух работах [Каменева, Скамницкая, 2003; Огородников и др., 2013]. Во второй из указанных монографий содержится целый раздел под авторством Л. С. Скамницкой и Т. П. Бубновой, посвящен-

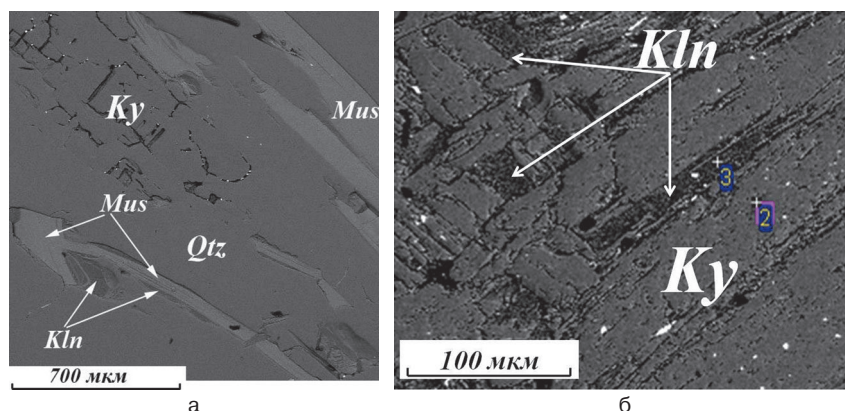


Рис. 9. Морфоструктурные особенности каолинита (а) и каолинизация кянита (б), Восточная линза:

Ку – кянит, Qtz – кварц, Mus – мусковит, Kln – каолинит. Изображение СЭМ VEGA II LSH (анализатор INCA Energy 350, ускоряющее напряжение 20 kV, ток зонда 350 pA). На фрагменте б: точка 2 – кянит, точка 3 – каолинит

Fig. 9. Morphostructural characteristics of kaolinite, Vostochnaya Lens:

Ky – kyanite, Qtz – quartz, Mus – muscovite, and Kln – kaolinite. VEGA II LSH scanning electron microscope (INCA Energy 350 analyzer, accelerating voltage 20kV, probe current 350 pA). In frag. b: point 2 – kyanite, point 3 – kaolinite

ный последовательным этапам исследований и результатам обогащения кианитовых руд, в частности, месторождения Южная линза.

Пределы колебаний содержания  $Al_2O_3$  в изученных рудах Хизоваарского рудного поля имеют широкий диапазон – от 9 до 38 %. В процессе длительного технологического изучения анализировались возможные варианты схем обогащения, различные методы обогащения и типы флотационных реагентов. В отдельных случаях нарабатывались опытные лабораторные и полупромышленные партии кианитовых концентратов для оценки их пригодности в производстве огнеупоров и силумина.

Основными минералами у всех генетических типов руд, удаляемыми при обогащении, являются кварц, пирит, рутил, распределенные в массе породы крайне неравномерно.

Реагентный режим флотации кианита, основанный на применении сульфоната, включал (расход реагентов, г/т):

– цикл сульфидной флотации: бутиловый ксантогенат – 150, аэрофлот – 150;

– цикл кианитовой флотации: сульфонат – 900, серная кислота – 680–810.

В этом реагентном режиме на опытно-промышленной установке Горного института КНЦ РАН наработано 10 т концентрата с содержанием глинозема 56–57 % при извлечении 60 % [Каменева, Скамницкая, 2003].

Флотация кианита, основанная на применении сульфонатов, обеспечивает получение концентрата, содержащего 55,0–58,0 %  $Al_2O_3$ , при извлечении 67,6 %  $Al_2O_3$  в лабораторных условиях.

При обогащении кианитсодержащей руды с применением олеиновой кислоты в щелочной среде, создаваемой содой, получены концентраты, содержащие 55,5–60,0 %  $Al_2O_3$ , при более высоком уровне технологического извлечения – до 80 % (табл. 2 и 3).

Следует отметить, что во всех испытаниях значительно пиритизированные кианитовые руды оставались вне зоны технологического изучения. Данная задача была поставлена и выполнена группой обогатителей Института

Таблица 2. Химический состав обогащаемой руды и партии кианитового концентрата

Table 2. Chemical composition of the ore dressed and a batch of kyanite concentrate

Продукт Product	Содержание, % по массе Content, mas. %								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	п.п.п. Loss on ignition	S
Руда Ore	62,00	0,84	26,80	5,65	0,39	0,35	0,60	1,48	3,95
Концентрат кианитовый Kyanite concentrate	39,22	1,29	56,67	0,62	0,45	0,63	0,19	0,89	0,18

Таблица 3. Характеристика технологических проб по опытным карьерам Южной линзы

Table 3. Characteristics of industrial samples from experimental quarries in South Lens

Залежь, карьер Body, quarry	Номер пробы Sample no	Интервал опробования, м Sampling interval, m	Содержание $Al_2O_3$ в руде $Al_2O_3$ content of ore	Морфология кианита Kyanite morphology	Содержание $Al_2O_3$ в концентрате $Al_2O_3$ content of concentrate
Залежь 4, карьер 3 Body 4, Quarry 3	X-1	15	14,68	Игольчатый Acicular	56,59
	X-2	8	28,84	Радиально-лучистый Radiated	55,89
	X-3	5	18,61	Игольчатый Acicular	56,90
Залежь 2, карьер 2 Body 2, Quarry 2	X-4	8	32,30	Радиально-лучистый Radiated	56,98
	X-5	6	18,36	Игольчатый Acicular	56,49
	X-13	4	28,41	Смешанный Mixed	57,57
Залежь 1, карьер 1 Body 1, Quarry 1	X-6	15	17,70	Игольчатый Acicular	56,21

геологии КарНЦ РАН. На стадии ревизионно-опробовательских работ оценены все разновидности кианитовых руд, включая сильно пиритизированные, относимые к забалансовым. Технологические пробы отобраны по трем опытным карьерам и разведочным канавам Южной линзы.

Для флотации силикатов наиболее часто используются анионные реагенты – жирные кислоты и их соли. Одним из существенных свойств силикатов, оказывающих большое влияние на их взаимодействие с анионным собирателем, является значительная сложность и изменчивость их катионного состава в результате образования изоморфных замещений в процессе рудообразования.

Изучение особенностей структуры, состава и морфологии кианита из пород различных генетических типов ряда объектов, а также включений в кианите показало, что содержание микроскопического рутила (в кианите из метасоматических руд) и графитизация метаморфических образований значительно ухудшают обогатимость кианитовой руды. Разработано технологическое решение по направленному изменению свойств минералов. Показано, что ультразвуковая обработка пульпы перед обесшламливанием позволяет удалить высвободившиеся зерна рутила со сливом крупностью до 40 мкм и повысить качество флотационного концентрата, снижая содержание  $TiO_2$  в нем до 0,7–1,1 % [Огородников и др., 2013].

Установлено, что количество адсорбированных на поверхности кианита кварца и силикатов катионов и гидроокислов многовалентных металлов определяет эффективность закрепления собирателя, особенно анионного. Наличие катионов многовалентных металлов в водной фазе пульпы приводит к частичному переводу жирных кислот во флотационно менее активные мыла многовалентных металлов.

Ввиду большой близости свойств силикатов эффективность их разделения в значительной степени определяется собирателем. Выбор собирателя для селективной флотации силикатов определяет принципиальную схему обогащения, способ подготовки пульпы к селективной флотации. Жирные кислоты и их соли (олеиновая кислота, олеат натрия и др.) наиболее часто используются при флотации силикатов. Они обеспечивают получение высоких показателей разделения, но чувствительны к жесткости воды, катионному составу пульпы и ее температуре. С понижением температуры растворимость их падает, а при  $T = 14\text{ }^\circ\text{C}$  они не растворяются.

Схема флотации кианита жирнокислотными собирателями состоит из 4–5 циклов. Часто флотации предшествует магнитная, электрическая сепарация или гравитация [Каменева, Скамницкая, 2003].

В отечественной и зарубежной литературе сообщается об успешном применении микробиологических методов в технологии обогащения и гидрометаллургической переработки руд и концентратов, содержащих алюминий [Аренс, 2001; Теляков и др., 2016].

### Маркетинговые исследования

Кианит в качестве конечного продукта используется в следующих направлениях огнеупорного производства [Щипцов, 2005; Огородников и др., 2012]:

- прецизионное литье;
- добавки в некоторые плавнелитые огнеупоры и монолитные материалы для контроля за расширением;
- наполнитель трещин из-за свойств расширения;
- в комплектующих для печей обжига и сушки (несущие элементы литья, печные стенки и т. п.);
- при производстве стальных компонентов аэродинамической поверхности;
- контроль за расширением в керамике;
- как компенсатор сокращения в огнеупорных керамических кирпичах;
- сырье для производства природного и синтетического муллита.

Во многих случаях кианит перед использованием в огнеупорах плавится или кальцинируется. Сырой кианит используется преимущественно в огнеупорах как компенсатор сжатия других ингредиентов. Это основная область применения тонкозернистого кианитового флотоконцентрата.

В настоящее время широкое применение находят оксинитридные соединения на основе системы «металл – кремний – алюминий – кислород – азот» (сиалоны).

Карельский кианит может обеспечить все потребности огнеупорной промышленности России. В этом направлении сотрудниками ИГ КарНЦ РАН подготовлен целый ряд публикаций [Демонис и др., 1990; Гаранжа, Заверткин, 2005; Заверткин и др., 2005, 2018; Лебедева, Инина, 2005; Скамницкая и др., 2008; Проблемы..., 2010; Заверткин, Щипцов, 2018 и др.].

Остается важным и вопрос о производстве керамических форм из карельского кианита для литья турбинных лопаток самолетных и ракетных двигателей после обжига суспензии

Таблица 4. Характеристика основных кианитовых объектов Хизоваарского рудного поля [Щипцов и др., 1988]  
 Table 4. Characteristics of major kyanite prospects in the Khizovaara Ore Field [Shchiptsov et al., 1988]

Месторождение Deposit		Хизоваарское Khizovaara		
		Южное Yuzhnoe	Восточное Vostochnoe	Северное Severnoe
Количество залежей (рудных тел) Number of ore bodies		6	1	1
Параметры залежей, м Body parameters, m	От – до From – to	40–100	До 150 (в раздуве) (in swells)	8–40
	Средняя мощность Average thickness	55	15	20
Протяженность Length		950	700	500
Условия залегания: глубина, м Mode of occurrence: depth, m		Более 150 More 150	-	-
Мощность наносов, м Detritus thickness, m		1,0–6,0	0–15	0–5
Горногеологические условия Geological and quarrying conditions		Руда по крепости (шкала буримости) – VIII категория. Отработка целесообразна многоступенным карьером с оставлением целиком на неблагонадежных местах. Гидрогеологические условия относительно усложненные Ore strength (drillability scale) – category VIII. Multi-bench quarrying with a pillar left in unreliable places is recommended. Hydrogeological conditions are relatively complex	Открытый способ разработки, гидрогеологические условия усложнены близостью к берегу оз. Верхнее Open-pit quarrying, hydrogeological conditions are complex due to proximity to Verkhneye Lake shore	Открытый способ разработки, гидрогеологические условия усложнены Open-pit quarrying, hydrogeological conditions are complex
Состав руд Ore composition		2 типа руд: первый тип – кварц 70–85 %, кианит 10–25 % (главные); мусковит, плагиоклаз, биотит, графит, тальк (второстепенные); пирит 0–10 %, пирротин, магнетит (рудные); рутил, апатит, сфен, гранат (акцессорные); второй тип – кварц 50–60 %, кианит 10–40 % (главные); мусковит, графит (второстепенные); пирит 0–10 %, пирротин, арсенопирит (рудные); рутил (акцессорные) Two ore types: in type I, quartz makes up 70–85 % and kyanite 10–25 % (major); muscovite, plagioclase, biotite, graphite, talc (minor); pyrite 0–10 %, pyrrhotite, magnetite (ore); rutile, apatite, csphene, garnet (accessory); in type II, quartz makes up 50–60 % and kyanite 10–40 % (major); muscovite, graphite (minor); pyrite 0–10 %, pyrrhotite, arsenopyrite (ore); rutile (accessory)	Кианит 3–23 %, кварц, полевой шпат, биотит, мусковит, графит (до 5–10 %) Кванит 3–23 %, quartz, feldspar, biotite, muscovite, graphite (up to 5–10 %)	Кианит 3–25 %, кварц, полевой шпат, биотит Kyanite 3–25 %, quartz, feldspar, biotite
Запасы, ресурсы, тыс. т (руда) Reserves, resources, thousand tons (ore)		V+C <sub>1</sub> 2881 P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> 16378	P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> 16000	C <sub>2</sub> 1556 P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub> 9153
Технологические особенности руд Technological characteristics of ores		Метод обогащения – флотация, реагентный режим – Know How. Продукты обогащения – кианитовый, кварцевый и пиритовый концентраты Dressing method: flotation, reagent regime: Know How. Dressing products: kyanite, quartz and pyrite concentrates	Метод обогащения – комбинированный (флотация и магнитная сепарация) Dressing method: combined (flotation and magnetic separation)	Метод обогащения – комбинированный (флотация и магнитная сепарация) Dressing method: combined (flotation and magnetic separation)
Прочие сведения Other information		Перспективные руды Promising ores	Малоперспективный тип руды Poorly promising ore type	Малоперспективный тип руды Poorly promising ore type



Окончание табл. 4  
Table 4 (continued)

Рекомендации Recommendations	Комплексная оценка с учетом кварца Integrated appraisal with regard for quartz	Комплексная оценка с учетом кварца и графита Integrated appraisal with regard for quartz and graphite	
---------------------------------	---	--	--

для керамических форм по выплавляемым моделям, используемым при точном литье. Тонкомолотый кианит может быть использован и в основных смесях для производства сантехники, стеновых плиток, литейных форм и специальной керамики.

Сотрудники ИГ КарНЦ РАН участвовали в подготовке материалов по противопопригарным покрытиям [Володина и др., 1990; Карпович и др., 1995; Щипцов, 2005, 2011; Проблемы..., 2010; Огородников и др., 2012].

Выявлены новые области использования кианита:

- как заменитель асбеста;
- в производстве алюмокремниевых сплавов;
- наличие свободного кварца в составе кианитового концентрата позволяет использовать его при производстве стекловолокна.

## Заключение

К заключению данной статьи, составленной по фрагментам многолетних исследований ИГ КарНЦ РАН и других организаций, в таблице 4 обобщена характеристика основных объектов Хизоваарского кианитового поля.

Дефицит огнеупорных материалов в различных отраслях промышленности обуславливает необходимость расширения минерально-сырьевой базы. Кианит – это материал XXI века, и потенциальная сырьевая база кианита России связывается с Карельским регионом.

Технико-экономические расчеты показывают преимущества использования кианитовых пород в производстве литья, огнеупорных футеровочных масс и неформованных изделий, а также специальной керамики.

Потребности в кианитовых концентратах превышают ожидаемые производственные возможности. Руды имеют предельно простой минералогический состав, и на их сырьевой базе можно создать безотходное производство концентратов с выделением в качестве товарных продуктов кианита, кварца, пирита. Ресурсы сырья достаточны для производства концентратов.

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (тема НИР № АААА-А18-118020290175-2).*

## Литература

Алексеев В. С. Обогащение и переработка кианитовых руд // Обогащение руд и проблема безотходной технологии. Л.: Наука, 1980. С. 133–146.

Алексеев В. С. Теория и практика обогащения кианитовых руд. Л.: Наука, 1976. 200 с.

Аренс Ф. Ж. Физико-химические геотехнологии. М.: МГУ, 2001. 656 с.

Бибикова Е. В., Самсонов А. В., Щипанский А. А., Богина М. М., Грачева Т. В., Макаров В. А. Хизоваарская структура Северо-Карельского зеленокаменного пояса как аккрецированная островная дуга позднего архея: изотопно-геохронологические и петрологические данные // Петрология. 2003. Т. 11, № 3. С. 289–320.

Борисов П. А., Волотовская Н. А. Хизоваарское месторождение кианита (КФССР) // Советская геология. 1941. № 6. С. 82–86.

Бушмин С. А., Глебовицкий В. А. Схема минеральных фаций метаморфических пород // Зап. РМО. 2008. Т. СXXXVII, № 2. С. 1–13.

Бушмин С. А. Метасоматиты месторождения Хизовара (Северная Карелия) // Изв. АН СССР, сер. геол. 1978. № 7. С. 127–138.

Бушмин С. А. Фации, фациальные серии метасоматитов и рудная специализация метаморфических поясов // Метасоматиты докембрия и их рудоносность. М., 1989. С. 46–64.

Володина С. В., Заверткин А. С., Скамницкая Л. С., Лебедева Г. А., Озерова Г. П. Изучение геллефлинты и кианитсодержащих материалов в качестве противопопригарных покрытий для петругических расплавов // Геолого-технологические исследования минерального сырья Карелии: опер.-информ. матер. Петрозаводск, 1990. С. 20–24.

Волотовская Н. А., Жиров К. К. Хромсодержащие минералы свиты Хизоваара // Изв. Карело-Финской научно-исслед. базы АН СССР. 1948. № 1. С. 41–53.

Гаранжа А. В., Заверткин А. С. Кианитовые породы Карело-Кольского региона и пути их применения // Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических матери-

алов: Матер. междунар. конф. Петрозаводск, 2005. С. 36–39.

*Геологическое и технологическое исследование кианитовых руд Хизоваарского месторождения (Северная Карелия) и их практическое значение // Комплексное освоение минеральных ресурсов Севера и Северо-Запада СССР (Европейская часть). Петрозаводск: Карел. науч. центр АН СССР, 1990. С. 132–135.*

*Глебовицкий В. А. Проблемы эволюции метаморфических процессов в подвижных областях. Л.: Наука, 1973. 127 с.*

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

*Голованов Ю. Б., Щипцов В. В. Кианит // Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. Петрозаводск: Карелия, 2006. С. 69–71.*

*Гродницкий Л. Л., Ручьев А. М., Крохин А. И. Лоушское пегматитовое поле. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1985. 177 с.*

*Данилов В. Г. Обогащение кианитовых руд // Тр. Института «Механобр». Л., 1957. С. 196–209.*

*Демонис И. М., Карпович Ю. Ф., Озерова Г. П., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Кианитовые руды месторождения Хизоваара – перспективный вид огнеупорного сырья // Фундаментальные науки – народному хозяйству. М.: Наука, 1990. С. 692–694.*

*Заверткин А. С., Гоголев М. А., Фролов П. В. Микроструктура, вещественный состав кианитовых пород Хизоваарского месторождения и пути их применения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 144–145.*

*Заверткин А. С., Щипцов В. В., Ененко В. П. Возможности применения в производстве огнеупоров кианитов Хизоваарского месторождения // Новые огнеупоры. 2005. № 4. С. 87–92.*

*Заверткин А. С., Щипцов В. В. Состояние и перспективы применения кианита в огнеупорных и противопожарных материалах // Новые огнеупоры. 2018. № 7. С. 7–12.*

*Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С. Обогащение минерального сырья Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 230 с.*

*Карпович Ю. Ф., Демонис И. А., Панина М. Е., Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Озерова Г. П. Суспензия для форм по выплавляемым моделям. Патент № 1656761. 1995.*

*Кожевников В. Н., Самсонов А. В., Щипанский А. А. Архейский Хизоваарский зеленокаменный пояс в районе оз. Верхнее: общие черты геологического строения и эволюции // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения: Матер. науч. конференции и путеводитель экскурсии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 31–52.*

*Кожевников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 223 с.*

*Козловский Е. А. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике мира и России. М.: РГГУ, ВНИИгеосистем, 2014. 605 с.*

*Коротеев В. А., Огородников В. Н., Щипцов В. В., Войтеховский Ю. Л. Морфогенетические типы кианита в докембрийских метаморфических комплексах // Петрография магматических и метаморфических пород: Мат. XII Всерос. Петрограф. совещ. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 320–323.*

*Кривовичев В. Г. Минералогический словарь. СПб.: С.-Петерб. ун-т, 2008. 556 с.*

*Лебедева Г. А., Инина И. С. Исследование возможности применения кианита для получения кордиеритовой керамики // Огнеупоры и техническая керамика. 2005. № 9. С. 40–42.*

*Материалы к стратиграфическому словарю по докембрию КАСССР / Отв. ред. В. А. Соколов. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1982. 137 с.*

*Небокситовое алюминиевое сырье России / Отв. ред. В. А. Коротеев. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 228 с.*

*Огородников В. Н., Коротеев В. А., Войтеховский Ю. Л., Щипцов В. В. Кианитовые руды России. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. 334 с.*

*Огородников В. Н., Коротеев В. А., Войтеховский Ю. Л., Щипцов В. В., Поленов Ю. А., Савичев А. Н., Нерадовский Ю. Н., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Гришин Н. Н., Белогурова О. А., Гершенков А. Ш., Коротеев Д. В. Морфогенетические типы и технология обогащения кианитовых руд. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. 310 с.*

*Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала: Матер. Всерос. совещ., посв. 80-летию КНЦ РАН / Под ред. Ю. Л. Войтеховского. Апатиты: К&М, 2010. 186 с.*

*Рыбаков С. И., Мельянцева Н. В. Хизоваарская палеовулканологическая постройка // Геология докембрия Карелии (опер.-информ. матер.). Петрозаводск, 1986. С. 16–18.*

*Самсонов А. В., Бибикина Е. В., Щипанский А. А. и др. Геохронология и петрология Хизоваарской структуры, Северокарельский зеленокаменный пояс: стадийность формирования и геодинамические режимы // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты: Тез. докл. I Рос. конф. по изотопной геохронологии. М.: ГЕО, 2000. С. 362–329.*

*Светов С. А., Степанова А. В., Чаженгина С. Ю., Светова Е. Н., Рыбникова З. П., Михайлова А. И., Парамонов А. С., Утицына В. Л., Эхова М. В., Колодей В. С. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 54–73. doi: 10.17076/geo140*

*Сергеев С. А., Лобач-Жученко С. Б. Возраст фукситовых метасоматитов Хизоваары (Северная Карелия) по результатам U-Pb датирования единичных зерен циркона // ДАН. Т. 333, № 1. 1993. С. 73–75.*

*Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Перспективы промышленного использования кварцевых отходов обогащения кианитовых руд Хизоваарского рудного поля (Республика Карелия) // Огнеупоры и техническая керамика. 2016. № 6. С. 43–49.*

*Скамницкая Л. С., Щипцов В. В., Бубнова Т. П. Промышленный минерал кианит Хизоваарского месторождения (Северная Карелия): технологические аспекты // Типоморфные минералы и минеральные*

ассоциации – индикаторы масштабности природных и техногенных месторождений и качества руд: Матер. Всерос. науч. конф. Годичное собрание РМО. Екатеринбург: УРО РАН, 2008. С. 138–140.

Теляков Н. М., Дарьин А. А., Луганов В. А. Перспективы применения биотехнологий в металлургии и обогащении // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 113–124.

Щипцов В. В., Гаранжа А. В., Сыстра Ю. Й., Щипцова Н. И., Кулмала Т. К., Бородулин Ю. Д., Сканницкая Л. С., Захарова И. Б., Морозов Г. Г., Каненкова Е. А., Байбусинов Ш. Ш. Хизоваарское кианитовое поле (Северная Карелия). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1988. 104 с.

Щипцов В. В. Кианит – эффективный огнеупор (сферы потребления, производители и мировая торговля) // Новые огнеупоры. 2005. № 8. С. 78–86.

Щипцов В. В. Минералогия кианитовых руд Карелии // Юшкинские чтения – 2018. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2018. С. 219–220.

Щипцов В. В. Потенциальная минерально-сырьевая база глиноземистых руд Республики Карелия // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 146–162.

Bushmin S. A., Glebovitsky V. A. Scheme of mineral facies of metamorphic rocks and its application to the Fennoscandian Shield with representative sites of orogenic gold mineralization // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 2. P. 3–27. doi: 10.17076/geo265

Condie K. Archaean andesites // Orogenic andesites and related rocks. 1982. P. 575–590.

## References

Alekseev V. S. Obogashchenie i pererabotka kianitovykh rud [Enrichment and processing of kyanite ores]. *Obogashchenie rud i probl. bezotkhodnoi tekhnol.* [Ore processing and the problem of non-waste technol.]. Leningrad: Nauka, 1980. P. 133–146.

Alekseev V. S. Teoriya i praktika obogashcheniya kianitovykh rud [Theory and practice of kyanite ores enrichment]. Leningrad: Nauka, 1976. 200 p.

Arens F. Zh. Fiziko-khimicheskie geotekhnologii [Physicochemical geotechnology]. Moscow: MGU, 2001. 656 p.

Bibikova E. V., Samsonov A. V., Shchipanskii A. A., Bogina M. M., Gracheva T. V., Makarov V. A. Khizovaarskaya struktura Severo-Karel'skogo zelenokamennogo poyasa kak akkretirovannaya ostrovnaya duga pozdnego arkheya: izotopno-geokhronologicheskie i petrologicheskie dannye [Khizovaara structure of the North Karelian greenstone belt as an accreted island arch of the Late Archean: isotope-geochronological and petrological data]. *Petrologiya* [Petrology]. 2003. Vol. 11, no. 3. P. 289–320.

Borisov P. A., Volotovskaya N. A. Khizovaarskoe mestorozhdenie kianita (KFSSR) [Khizovaara kyanite deposit (KFSSR)]. *Sovetskaya geol.* [Soviet Geol.]. 1941. No. 6. P. 82–86.

Bushmin S. A., Glebovitskii V. A. Skhema mineral'nykh fatsii metamorficheskikh porod [Scheme of mineral facies of metamorphic rocks]. *Zap. RMO* [Proceed. RMS]. 2008. Vol. CXXXVII, no. 2. P. 1–13.

Graesberg M. Swedish kyanite – new source of alumina for refractories and ceramics. *Proceed. of 7<sup>th</sup> Industrial Minerals Int. Congress.* 1986. P. 77–85.

Nikiforov A. G., Bubnova T. P. Geological and technological mapping of industrial types of muscovite ores of Eastern Hizovaara structure (Republic of Karelia) // Обогащение руд. 2018. № 5. С. 49–56.

Shchipansky A. A., Samsonov A. V., Bibikova E. V., Babarina I. I., Krylov K. A., Konilov A. N., Slabunov A. I., Bogina M. M. 2.8 Ga boninite-hosting partial supra-subduction ophiolite sequences from the North Karelian greenstone belt, NE Baltic Shield, Russia // *Precambrian Ophiolites and Related Rocks* / Eds. T. Kusky, V. Veensstra, K. Condie. Amsterdam: Elsevier, 2004. P. 425–487.

Shchiptsov V. V. Mineral raw materials base of high-alumina ores of the Republic Karelia (Russia) // SGEM2014 Conf. *Proceed.* Sofia Bulgaria, 2014. Vol. 1. P. 215–222.

Shchiptsov V. V., Nikiforov A. G. Contribution of metasomatic processes to the formation of industrial minerals in Khizovaara ore field, Republic of Karelia, Russia // 16<sup>th</sup> Int. multidisciplinary sci. geoconf. SGEM 2016. Book 1. Sci. and Technologies in Geol., Exploration and Mining. Conf. *proceed.* Vol. I. P. 125–132.

*The economics of kyanite* // Roskill Information Services Ltd. London, 1990. 146 p.

Thompson R. N. Magmatism of the British Tertiary volcanic province // *Scott. J. Geol.* 1982. No. 18. P. 49–107.

Поступила в редакцию 19.05.2020

Bushmin S. A. Metasomatity mestorozhdeniya Khizovaara (Severnaya Kareliya) [Metasomatites of the Khizovaara deposit (North Karelia)]. *Izv. AN SSSR, Ser. Geol.* [Proceed. Acad. Sci. USSR, Geol. Ser.]. 1978. No. 7. P. 127–138.

Bushmin S. A. Fatsii, fatsial'nye serii metasomatitov i rudnaya spetsializatsiya metamorficheskikh poyasov [Facies, facies series of metasomatites and ore specialization of metamorphic belts]. *Metasomatity dokembriya i ikh rudonosnost'* [Precambrian metasomatites and their ore content]. Moscow: Nauka, 1989. P. 46–64.

Danilov V. G. Obogashchenie kianitovykh rud [Enrichment of kyanite ores]. *Tr. Inst. "Mekhanobr"* [Proceed. Mekhanobr Inst.]. Leningrad, 1957. P. 196–209.

Demonis I. M., Karpovich Yu. F., Ozerova G. P., Skamnitskaya L. S., Shchiptsov V. V. Kianitovye rudy mestorozhdeniya Khizovaara – perspektivnyi vid ognepornogo syr'ya [Kyanite ores of the Khizovaara deposit – a promising type of refractory raw materials]. *Fund. nauki – narodnomu khoz.* [Achievement of sci. – to the national economy]. Moscow: Nauka, 1990. P. 692–694.

Garanzha A. V., Zavyortkin A. S. Kianitovye porody Karelo-Kol'skogo regiona i puti ikh primeneniya [Kyanite rocks of the Karelian-Kola region and ways of their application]. *Probl. rats. ispol'zovaniya prirod. i tekhnogennogo syr'ya Barentseva reg. v tekhnol. stroitel'nykh i tekhn. mat.*: Mat. mezhdunarod. konf. [Probl. of rational use of nat. and technogenic raw mat. of the Barents re-



gion in the technology of building and tech. mat.: Proceed. int. conf.]. Petrozavodsk, 2005. P. 36–39.

*Geologicheskoe i tekhnologicheskoe issledovanie kyanitovykh rud Khizovaarskogo mestorozhdeniya (Severnaya Kareliya) i ikh prakticheskoe znachenie* [Geological and technological study of kyanite ores of the Khizovaara deposit (North Karelia) and their practical significance]. *Kompleksnoe osvoenie mineral'nykh resursov Severa i Severo-Zapada SSSR (Evropeiskaya chast')* [Integrated development of mineral resources of the North and North-West of the USSR (European part)]. Petrozavodsk, 1990. P. 132–135.

*Glebovitskii V. A.* Problemy evolyutsii metamorficheskikh protsessov v podvizhnykh poyasakh [Problems of the evolution of metamorphic processes in mobile zones]. Leningrad: Nauka, 1973. 128 p.

*Glebovitskii V. A., Bushmin S. A.* Poslemigmatitovyy metasomatoz [Postmigmatitic metasomatism]. Leningrad: Nauka, 1983. 216 p.

*Golovanov Yu. B., Shchiptsov V. V.* Kyanit [Kyanite]. *Mineral'no-syr'yevaya baza Respubliki Kareliya* [Mineral resources base of the Republic of Karelia]. Petrozavodsk: Kareliya, 2006. Book. 2. P. 69–71.

*Grodnitskii L. L., Ruch'ev A. M., Krokhin A. I.* Loushskoe pegmatitovoe pole [Loushi pegmatite field]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1985. 177 p.

*Kameneva E. E., Skamnitskaya L. S.* Obogashchenie mineral'nogo syr'ya Karelii [Enrichment of mineral raw materials of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. 230 p.

*Karpovich Yu. F., Demonis I. A., Panina M. E., Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S., Ozerova G. P.* Suspenziya dlya form po vyplavlyaemym modelyam [Lost wax molds]. Patent No. SU1656761A1. 1995.

*Koroteev V. A., Ogorodnikov V. N., Shchiptsov V. V., Voitekhovskii Yu. L.* Morfogeneticheskie tipy kyanita v dokembriyskikh metamorficheskikh kompleksakh [Morphogenetic types of kyanite in the Precambrian metamorphic complexes]. *Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh porod: Mat. XII Vseros. Petrograficheskogo soveshch.* [Petrography of igneous and metamorphic rocks: Proceed. XII All-Russ. petrographic meeting]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 320–323.

*Kozhevnikov V. N., Samsonov A. V., Shchipanskii A. A.* Arkheiskii Khizovaarskii zelenokamennyi poyas v rayone oz. Verkhnee: obshchie cherty geologicheskogo stroeniya i evolyutsii [Archean Khizovaara greenstone belt in the area of Lake Verkhnee: general features of the geological structure and evolution]. *Putevoditel' ekskursii: Belomorskii podvizhnyi poyas i ego analogi: geol., geokhronologiya, geodinamika, minerageniya* [A guided tour: Belomorsky mobile belt and its analogues: geol., geochronology, geodynamics, and mineralogy]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 31–52.

*Kozhevnikov V. N.* Arkheiskie zelenokamennyye poyasa Karelskogo kratona kak akkretionnyye orogeny [Archean greenstone belts of the Karelian craton as accretionary orogens]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2000. 223 p.

*Kozlovskii E. A.* Mineral'no-syr'yevyye resursy v ekonomike mira i Rossii [Mineral resources in the economy of the world and Russia]. Moscow: RGGU, VNIIGeosistem, 2014. 605 p.

*Krivovichev V. G.* Mineralogicheskii slovar' [Mineralogical dictionary]. St. Petersburg: St. Petersburg Univ., 1956 p.

*Lebedeva G. A., Inina I. S.* Issledovanie vozmozhnosti primeneniya kyanita dlya polucheniya kordieritovoi keramiki [Study of the possibility of using kyanite to obtain cordierite ceramics]. *Ogneupory i tekhn. keramika* [Refractories and Tech. Ceramics]. 2005. No. 9. P. 40–42.

*Materialy k stratigraficheskomu slovaryu po dokembriyu KASSR* [Materials for the stratigraphic dictionary of the Precambrian KASSR]. Ed. V. A. Sokolov. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1982. 137 p.

*Neboksitovoe alyuminievoe syr'e Rossii* [Non-bauxite aluminum raw materials of Russia]. Ed. V. A. Koroteev. Ekaterinburg: IGG UrB RAN, 2011. 228 p.

*Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Voitekhovskii Yu. L., Shchiptsov V. V.* Kyanitovyye rudy Rossii [Kyanite ores of Russia]. Ekaterinburg: IGG UrO RAS, 2012. 334 p.

*Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Voitekhovskii Yu. L., Shchiptsov V. V., Polenov Yu. A., Savichev A. N., Neradovskii Yu. N., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Grishin N. N., Belogurova O. A., Gershenkop A. Sh., Koroteev D. V.* Morfogeneticheskie tipy i tekhnologiya obogashcheniya kyanitovykh rud [Morphogenetic types and technology of enrichment of kyanite ores]. Ekaterinburg: RIO UrB RAS, 2013. 310 p.

*Problemy osvoeniya kyanitovykh mestorozhdenii Kol'skogo poluostrova, Karelii i Urala: mat. Vseros. soveshch., posv. 80-letiyu KNTs RAN* [Problems of development of kyanite deposits of the Kola Peninsula, Karelia and the Urals: Proceed. All-Russ. meeting dedicated to the 80<sup>th</sup> anniv. of KarRC RAS]. Apatity: K&M, 2010. 186 p.

*Rybakov S. I., Mel'yantsev N. V.* Khizovaarskaya paleovolkanologicheskaya postroika [Khizovaara paleovolcanological building]. *Geol. dokembriya Karelii (oper.-inf. mat.)* [Geol. of the Precambrian Karelia]. Petrozavodsk, 1986. P. 16–18.

*Samsonov A. V., Bibikova E. V., Shchipanskii A. A. et al.* Geokhronologiya i petrologiya Khizovaarskoi struktury, Severokarel'skii zelenokamennyi poyas: stadiinost' formirovaniya i geodinamicheskie rezhimy [Geochronology and petrology of the Khizovaara structure, North Karelian greenstone belt: formation stages and geodynamic regimes]. *Izotopnoe datirovanie geol. protsessov: novyye metody i rezul'taty: Tez. dokl. 1 Ros. konf. po izotopnoi geokhronologii* [Isotopic dating of geological processes: new methods and results. Proceed. 1<sup>st</sup> Russ. conf. on isotope geochronology]. Moscow: GEO, 2000. P. 362–329.

*Sergeev S. A., Lobach-Zhuchenko S. B.* Vozrast fuksitovykh metasomatitov Khizovaary (Severnaya Kareliya) po rezul'tatam U-Pb datirovaniya edinichnykh zeren tsirkona [Age of fuchsite metasomatites of Khizovaara (North Karelia) according to the results of U-Pb dating of single zircon grains]. *DAN* [Proceed. Acad. Sci.]. 1993. Vol. 333, no. 1. P. 73–75.

*Shchiptsov V. V., Garanzha A. V., Systra Yu. I., Shchiptsova N. I., Kulmala T. K., Borodulin Yu. D., Skamnitskaya L. S., Zakharova I. B., Morozov G. G., Kanenkova E. A., Baibusinov Sh. Sh.* Khizovaarskoe kyanitovoe pole (Severnaya Kareliya) [Khizovaara kyanite field (northern Karelia)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1988. 104 p.



Shchiptsov V. V. Kianit – effektivnyi ogneupor (sfery potrebleniya, proizvoditeli i mirovaya trgovlya) [Kyanite is an effective refractory (consumer goods, manufacturers, and world trade)]. *Novye ogneupory* [New Refractories]. 2005. No. 8. P. 78–86.

Shchiptsov V. V. Mineralogiya kyanitovykh rud Karelii [Mineralogy of kyanite ores of Karelia]. *Yushkinskiye chteniya – 2018* [Yushkinsky Readings – 2018]. Syktyvkar: IG KomiSC UrB RAN, 2018. P. 219–220.

Shchiptsov V. V. Potentsial'naya mineral'no-syr'yevaya baza glinozemistykh rud Respubliki Kareliya [Potential mineral resource base of aluminous ores of the Republic of Karelia]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Minerals of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. P. 146–162.

Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Perspektivy promyshlennogo ispol'zovaniya kvartsevykh otkhodov obogashcheniya kyanitovykh rud Khizovaarskogo rudnogo polya (Respublika Kareliya) [Prospects for the industrial use of quartz wastes from the enrichment of kyanite ores of the Khizovaara ore field (Republic of Karelia)]. *Ogneupory i tekhn. keramika* [Refractories and Tech. Ceramics]. 2016. No. 6. P. 43–49.

Skamnitskaya L. S., Shchiptsov V. V., Bubnova T. P. Promyshlennyy mineral kyanit Khizovaarskogo mestorozhdeniya (Severnaya Kareliya): tekhnologicheskie aspekty [The industrial mineral kyanite of the Khizovaara deposit (North Karelia): technological aspects]. *Tipomorfnye mineraly i mineral'nye assotsiatsii – indikatory masshtabnosti prirod. i tekhnogennykh mestorozhdenii i kachestva rud: Mat. vseros. nauch. konf. Godichnoe sobranie RMO* [Typomorphic minerals and mineral associations – indicators of the scale of natural and technogenic deposits and ore quality: Proceed. All-Russ. sci. conf. RMS Annual Meeting]. Ekaterinburg: IGG UrB RAS, 2008. P. 138–140.

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Rybnikova Z. P., Mikhailova A. I., Paramonov A. S., Utitsyna V. L., Ekhovala M. V., Kolodei V. S. Pretsizionnyy (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornyykh porod i mineralov: metodika i otsenka tochnosti rezul'tatov na primere rannedokembriiskikh mafitovykh kompleksov [Precision geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of rock and mineral composition: The method and accuracy estimation in the case study of Early Precambrian mafic complexes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 7. P. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Telyakov N. M., Dar'in A. A., Luganov V. A. Perspektivy primeneniya biotekhnologii v metallurgii i obogashchenii [Prospects for the use of biotechnology in metallurgy and enrichment]. *Zapiski Gornogo inst.* [Proceed. Mining Inst.]. 2016. Vol. 217. P. 113–124.

Volodina S. V., Zavertkin A. S., Skamnitskaya L. S., Lebedeva G. A., Ozerova G. P. Izuchenie gelleflinty i kyanitsoderzhashchikh materialov v kachestve protivoprigarnykh pokrytii dlya petrurgicheskikh rasplavov [The study of helleflint and kyanite-containing materials as non-stick coatings for peturgic melts]. *Geologo-tekhnol. issled. mineral'nogo syr'ya Karelii: oper.-inf. mat.* [Geological and technol. res. of mineral raw materials of Karelia: Oper.-inf. mat.]. Petrozavodsk, 1990. P. 20–24.

Volotovskaya N. A., Zhiron K. K. Khromsoderzhashchie mineraly svity Khizovaara [Chromium-containing minerals of the Khizovaara formation]. *Izv. Karelo-Finskoi nauchno-issled. bazy AN SSSR* [Izv. Karelian-Finnish res. base of the USSR Acad. Sci.]. 1948. No. 1. P. 41–53.

Zavertkin A. S., Gogolev M. A., Frolov P. V. Mikrostruktura, veshchestvennyi sostav kyanitovykh porod Khizovaarskogo mestorozhdeniya i puti ikh primeneniya [Microstructure, material composition of kyanite rocks of the Khizovaara deposit and ways of their application]. *Trudy Fersmanovskoi nauch. sessii GI KNTs RAN* [Proceed. Fersmanov sci. session of the Kola Sci. Center RAS]. Apatity, 2018. No. 15. P. 144–145.

Zavertkin A. S., Shchiptsov V. V., Eenko V. P. Vozmozhnosti primeneniya v proizvodstve ogneuporov kyanitov Khizovaarskogo mestorozhdeniya [Possibilities of application in the production of kyanite refractories in the Khizovaara deposit]. *Novye ogneupory* [New Refractories]. 2005. No. 4. P. 87–92.

Zavertkin A. S., Shchiptsov V. V. Sostoyanie i perspektivy primeneniya kyanita v ogneupornykh i protivoprigarnykh materialakh [The state and prospects of the use of kyanite in refractory and non-stick materials]. *Novye ogneupory* [New Refractories]. 2018. No. 7. P. 7–12.

Bushmin S. A., Glebovitsky V. A. Scheme of mineral facies of metamorphic rocks and its application to the Fennoscandian Shield with representative sites of orogenic gold mineralization. *Trans. KarRC RAS*. 2016. No. 2. P. 3–27. doi: 10.17076/geo265

Condie K. Archaean andesites. *Orogenic andesites and related rocks*. 1982. P. 575–590.

Graesberg M. Swedish kyanite – new source of alumina for refractories and ceramics. *Proceed. of 7<sup>th</sup> Industrial Minerals Int. Congress*. 1986. P. 77–85.

Nikiforov A. G., Bubnova T. P. Geological and technological mapping of industrial types of muscovite ores of Eastern Hizovaara structure (Republic of Karelia). *Obogashchenie rud* [Mineral Processing J.]. 2018. No. 5. P. 49–56.

Shchipansky A. A., Samsonov A. V., Bibikova E. V., Babarina I. I., Krylov K. A., Konilov A. N., Slabunov A. I., Bogina M. M. 2.8 Ga boninite-hosting partial supra-subduction ophiolite sequences from the North Karelian greenstone belt, NE Baltic Shield, Russia. *Precambrian Ophiolites and Related Rocks*. Eds. T. Kusky, V. Veestra, K. Condie. Amsterdam: Elsevier, 2004. P. 425–487.

Shchiptsov V. V. Mineral raw materials base of high-alumina ores of the Republic Karelia (Russia). *SGEM 2014 Conf. Proceed.* Sofia, Bulgaria, 2014. Vol. 1. P. 215–222.

Shchiptsov V. V., Nikiforov A. G. Contribution of metasomatic processes to the formation of industrial minerals in Khizovaara ore field, Republic of Karelia, Russia. *16<sup>th</sup> Int. multidisciplinary sci. geoconf. SGEM 2016*. Book 1. Sci. and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conf. proceed. Vol. I. P. 125–132.

*The economics of kyanite. Roskill Information Services Ltd.* London, 1990. 146 p.

Thompson R. N. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scott. J. Geol.* 1982. No. 18. P. 49–107.

Received May 19, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Щипцов Владимир Владимирович**

заведующий отделом минерального сырья,  
д. г.-м. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: vv.shchiptsov@gmail.com  
тел.: +79216240981

### **Бубнова Татьяна Петровна**

научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: bubnova@krc.karelia.ru  
тел.: (814) 768092

### **Заверткин Александр Сергеевич**

старший научный сотрудник, к. т. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: zavertkin@igkrc.ru  
тел.: +79214572221

### **Никифоров Александр Геннадьевич**

научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: eoaster@yandex.ru

### **Скамницкая Любовь Степановна**

старший научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: skamnits@krc.karelia.ru  
тел.: (814) 768092

### **Фролов Петр Владимирович**

научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: pv.frolov@yandex.ru  
тел.: +79218004150

## CONTRIBUTORS:

### **Shchiptsov, Vladimir**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com  
tel.: +79216240981

### **Bubnova, Tatyana**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: bubnova@krc.karelia.ru  
tel.: (814) 768092

### **Zavertkin, Alexander**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: zavertkin@igkrc.ru  
tel.: +79214572221

### **Nikiforov, Alexander**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: eoaster@yandex.ru

### **Skamnitskaya, Lubov**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: skamnits@krc.karelia.ru  
tel.: (814) 768092

### **Frolov, Pyotr**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: pv.frolov@yandex.ru  
tel.: +79218004150