

УДК 553.67:666.762.34(470.22)

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ УЛЬТРАМАФИТОВ АГАНОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХРОМОВЫХ РУД В ПРОИЗВОДСТВЕ ОГНЕУПОРОВ И КЕРАМИКИ



В. П. ИЛЬИНА,
старший научный сотрудник, канд. техн. наук,
ilyina@igkrc.ru



П. В. ФРОЛОВ,
научный сотрудник

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

Представлены результаты исследования высокомагнезиальных пород Аганозерского месторождения хромовых руд Республики Карелия. Оценены перспективы и области их применения.
Ключевые слова: Республика Карелия, Аганозерское месторождение, хромовые руды, дуниты, оливиниты, серпентиниты, пироксениты, область применения.
DOI: 10.17580/gzh.2019.03.16

Введение

Аганозерское месторождение хромовых руд находится на территории Пудожского района Республики Карелия и расположено в 45 км севернее г. Пудож. С геологической позиции месторождение входит в состав Бураковско-(Шалозёрско)-Аганозерского раннепротерозойского интрузивного массива [1], который является типичным представителем мафит-ультрамафитовых расслоенных интрузий, распространенных в восточной части Фенноскандинавского щита. Размер интрузива 50×(13–16) км, глубина залегания подошвы 3,5–7 км, форма лополитообразная (рис. 1). Характерна высокая степень дифференцированности и присутствие стратиформных хромитовых залежей [2, 3].

Месторождение является комплексным объектом. Потенциальными полезными ископаемыми, помимо основного – хромовых руд, могут быть магнезиальные ультрамафиты – оливиниты, дуниты, серпентиниты (кемиститы) и пироксениты, объемы которых значительны [4]. Высокомагнезиальные породы являются вскрышными и вмещающими для хромовых руд. Извлекаемые при комплексной разработке месторождения, они требуют утилизации в целях снижения экологического ущерба окружающей среде [4–7].

Методы исследования и обсуждение результатов

Минеральный состав ультрамафитов и изменение их структуры при термической обработке оценивали на основании данных электронной микроскопии (микроскоп Vega 2 LSH с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350 компании Oxford Instruments) и рентгенофазового анализа, выполненного на дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA Powder X-ray Diffraction

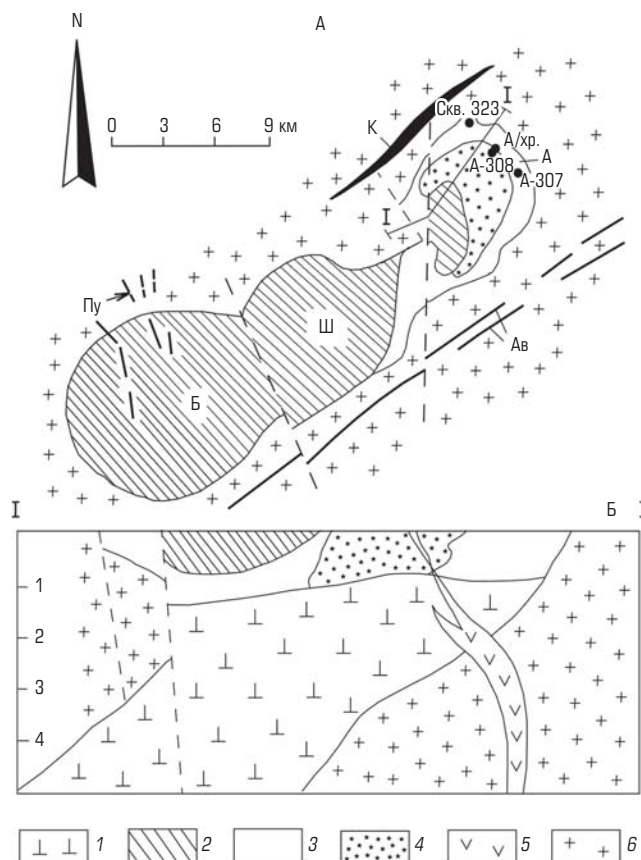


Рис. 1. Схематический геологический план Бураковско-(Шалозёрско)-Аганозерского интрузивного массива (А. Ф. Горшко, 1977):

1 – дуниты и оливиниты, частично – перидотиты; 2 – габбронориты; 3 – серпентиниты; 4 – никель-магнезиальные руды в проекции на земную поверхность; 5 – габбро-диабазы; 6 – вмещающие гранитоиды и другие породы. Блоки массива: Б – Бураковский, Ш – Шалозёрский, А – Аганозерский. Свиты даек: Ав – авдеевская, К – копполозерская, Пу – пудожгорская

System на медном излучении (Cu K α = 1,54 Å) в геометрии Брегга – Брентано. Химические анализы выполняли на масс-спектрометре X-SERIES-2 с приставкой лазерной абляции UP-266 Masco или методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РФА) на приборе ARL Advant X. Термические эффекты горных пород и керамических образцов изучали методом термографического анализа на синхронном термическом анализаторе STA 449 F1 Jupiter. Коэффициент теплопроводности определен с помощью измерителя теплопроводности марки ИТЭМ-1М в соответствии с ГОСТ 25499–82.

Оливиниты и дуниты. В Аганозерском блоке Бураковского расслоенного мафит-ультрамафитового массива фиксируются значительные скопления дунитов и оливинитов [6]. Дунитовая подзона ультраосновной зоны (УЗ) серпентинитов центральной части Аганозерского блока по всему разрезу однородна и характеризуется высоким содержанием оливина (88–98 %).

Содержание MgO варьирует в пределах 36,97–46,77 % при значительной мощности высокомагнезиальных дунитов (Fo_{85–90}) [3]. Дуниты характеризуются панидиоморфнозернистой структурой. В некоторых случаях наблюдается ориентированное расположение зерен, но преимущественно это массивная мономинеральная или субмономинеральная порода, состоящая из оливина, редкорассеянных зерен хромита (0,5–2 %) и непостоянно присутствующего пироксена (2–5 %), встречаются редкие зерна плагиоклаза и флогопита. Оливин и хромит – кумулятивные, пироксен и плагиоклаз – интераккумулятивные. Средний химический состав УЗ, рассчитанный на полный первичный объем блока, соответствует высокомагнезиальному дуниту (анализы выполнены в химической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН).

Дунит широко применяется в огнеупорной и керамической промышленности [7]. Добавление дунита и талька в глину позволяет получить особый кордиерит, стойкий к высоким температурам ввиду низкого расширения структуры полученного изделия. На его основе также производят различные аппараты для химической промышленности, которые имеют высокую термостойкость и менее восприимчивы к перепадам температуры, в отличие от фарфоровых изделий [8].

Дунит используют как в обожженном, так и в сыром виде, в процессе производства огнеупорных материалов вводят обожженный магнезит. Есть широкие перспективы использования дунита в составе строительных смесей благодаря его активным гидратационным и вяжущим свойствам. В частности, эффективно его применение в производстве цемента, что к тому же значительно снижает затраты на себестоимость смеси [9, 10]. Дунит используют в металлургической промышленности для получения огнеупорной составляющей плавильных печей (выдерживает высокие температуры до 1700 °С).

Оливин в мировом производстве широко используют в качестве огнеупоров в металлургии, в составе формовочных смесей. Требования, предъявляемые к оливину, довольно жесткие [11]. Используемое промышленностью оливиновое сырье не должно интенсивно подвергаться вторичным изменениям, и содержание MgO должно быть не менее 37 %. Оливины обладают высоким содержанием магния, превосходными термоаккумулирующими

Таблица 1. Химический состав серпентинитов

Оксиды	Кемистит, (по данным 60 анализов)	Серпентинит (среднее по 16 пробам)	Проба А-307, перидотиты	Кемистит	Проба А-скв. 323, массивный серпентинит
SiO ₂	32,59–32,91	34,06	40	32,44	33,39
TiO ₂	0,02	0,01	0,14	0,05	0,2
Al ₂ O ₃	0,1–0,43	0,51	1,42	1,28	0,22
Fe ₂ O ₃	7,21–9,8	10,02	10,7	4,88	6,31
FeO	2,09–3,78	2,03	3,9	1,72	3,51
MnO	0,12–0,14	0,12	0,22	0,03	0,13
MgO	37,16–37,83	35,69	28,6	37,49	40,42
CaO	0,24–0,47	0,5	4,19	<0,01	<0,01
Na ₂ O	0,03–0,33	0,03	0,27	0,12	0,02
K ₂ O	0,02–0,03	0,02	0,15	0,1	<0,01
H ₂ O	–	–	–	3,41	1,18
П.п.п.	15,03–17,75	17	9,77	18,02	15,69

Примечание. Анализы выполнены в химической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН.

свойствами, высокой относительной плотностью, стабильным химическим составом, высокой твердостью (6,5–7 по шкале Мооса), высокой точкой плавления 1760 °С. Оливин относится к изоморфному ряду форстерит-фаялит с общей формулой (Mg,Fe)₂[SiO₄]. В этих породах отсутствует химически связанная вода, они не дают усадки и не разрыхляются при обжиге. Форстерит после обжига и формирования форстеритовой фазы оказывает определяющее влияние на прочность, термостойкость и химическую стойкость керамики. Форстеритовые огнеупорные изделия обладают следующими свойствами: температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур 20–800 °С составляет 11,5·10⁻⁶ С⁻¹; теплопроводность в интервале 500–1000 °С – (1,07 + 5,9)·10⁻⁴ Вт/(м·К); газопроницаемость – 10 Им [12].

Серпентиниты. Аганозерское месторождение хромовых руд генетически связано с серпентинитами ультраосновной зоны дунитовой подзоны, залегающими в центральной части Аганозерского блока Бураковско-Аганозерской интрузии. Верхний горизонт вскрышных пород (20–70 м) представлен массивными неразрушающимися серпентинитами. Исследование вещественного состава массивного серпентинита (проба 323, табл. 1) свидетельствует о присутствии макро- и микроскопически тонкораспыленных включений магнетита, хромита; по ослабленным зонам, границам срастания в серпентине встречаются карбонаты, реликты оливина, сульфиды. Магнетит находится в виде обломков, уплощенных зерен, микровключений с размерами от 0,5–0,16 до 0,05 мм и менее (рис. 2). Минеральные агрегаты хромита в серпентине имеют размеры от 1,5–0,2 до 0,05 мм и менее. Они меняют окраску серпентина от бурой и темно-зеленой до черной, с эффектом частичного просвечивания в проходящем свете микроскопа.

Микроструктура перидотита (пробы А-307) аллотриоморфнозернистая, с петельчатыми элементами (рис. 3). Ее можно назвать псевдопорфировой, при которой в сплошной массе серпентина равномерно распределены ксеноморфные реликтовые зерна клинопироксена и оливина. Текстура массивная, но

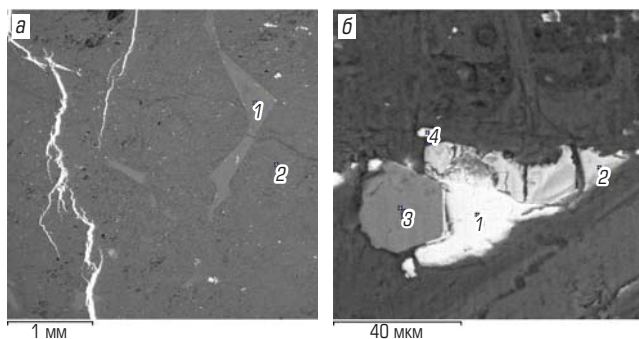


Рис. 2. Микроструктура серпентинитов Аганозерского месторождения (проба 323):

а: 1 – хлорит; 2 – серпентин; 3 – магнетит;
б: 1 – миллерит; 2 – магнетит; 3 – апатит; 4 – пентландит

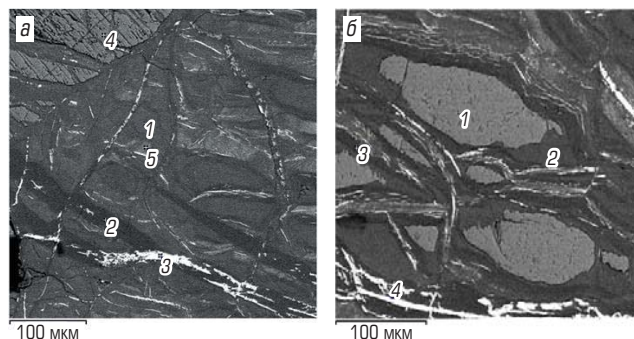


Рис. 3. Микроструктура перидотитов Аганозерского месторождения (проба 307):

а: 1, 2, 5 – серпентин, 3 – магнетит, 4 – клинопироксен;
б: 1 – оливин, 2, 3 – серпентин, 4 – магнетит

с директивной параллельной ориентировкой серпентинитового агрегата. Количество клинопироксена составляет около 35 %, оливина – порядка 3 %. Оставшийся объем породы выполнен серпентином и рудным минералом (магнетитом).

Более глубокие горизонты сложены серпентинитами (кемиститы) гидроталькит-лизардитового состава, которые отличаются от вмещающих серпентинитов высоким (70–95 %) содержанием кислоторастворимых форм никеля, магния и железа, метастабильностью, высокими пористостью и электропроводностью. Кемиститы представляют собой пелитодресвяную массу, образующуюся на завершающей стадии серпентинизации ультраосновных пород [6]. Кемиститы представлены алевритами от 0,01 до 0,1 мм, а также обломочными зернами песчаных, дресвяных и щебнистых разновидностей. Практически весь никель изоморфно входит в состав серпентинитов и гидроталькитов. По данным РФА и электронной микроскопии, кемиститы состоят в основном из серпентина (преимущественно лизардит – 78 %), кроме того, содержат гидрокарбонаты магния, хлорит, тальк, карбонаты (кальцит, магнезит, сидерит), биотит, магнетит, хромит, сульфиды, гидрогематит.

Исследование поведения кемистита при нагревании до 1000 °С показало, что разрушение кристаллической решетки серпентина (лизардита) с одновременным удалением конституционной воды происходит в интервале температур 600–650 °С. При 800–830 °С кристаллизуется форстерит, образовавшийся при разложении серпентина. Количество форстерита составляет 95 % и присутствует периклаз (5 %) [13].

Кемиститы, по результатам исследований А. Ф. Горошко, являются комплексным минеральным сырьем. Главные полезные компоненты – никель и магний, валовое содержание которых при разных вариантах подсчета составляет: Ni – 0,32–0,34 %; MgO – 38,47–38,55 %. Содержание полезных компонентов в кислоторастворимой форме: Ni – 0,24–0,29 %; MgO – 25,2–26,8 %. Они не поддаются обогащению и могут перерабатываться гидрометаллургическим способом, при этом в процессе технологических испытаний, выполненных на стандартном оборудовании по схеме сернокислотного передела, доказана возможность извлечения в конечный товарный продукт 64 % содержащегося в руде магния в виде чистой магнезии и 82 % никеля в виде водного сульфата.

Согласно результатам технико-экономических расчетов, выполненных в масштабе цен 1995 г., на базе месторождения может быть организовано высокорентабельное производство, ориентированное на извлечение в качестве основного продукта никеля [8].

На основе серпентинитов Аганозерского месторождения разработана сырьевая смесь для изготовления пористого теплоизоляционного материала с низкими показателями теплопроводности и высокой влагостойкостью, что позволяет использовать предлагаемую керамику в качестве теплозащитного материала для тепловых агрегатов и морозильных камер [14]. Методом электронной микроскопии установлено, что основной кристаллической фазой теплоизоляционной керамики является форстерит – продукт перекристаллизации серпентина. Рентгенофазовый анализ показал, что, кроме форстерита, присутствуют кварц (5 %), кристобалит (4 %), энстатит (7 %). Количество стеклофазы 13 %. Формирование пористой структуры теплоизоляционной керамики происходит при обжиге вследствие дегидратации химически связанной воды, содержащейся в серпентине, испарения жидкого стекла, а также за счет карбонатов и гидрокарбонатов, разлагающихся с выделением CO₂. Используемые в шихте природные компоненты, в том числе серпентин, позволяют получить материал с содержанием форстерита более 70 %, синтез которого начинает осуществляться при 600 °С. Это обеспечивает, по сравнению с известным составом, высокую прочность (табл. 2).

Серпентинсодержащие породы могут найти применение в производстве строительных материалов [15, 16] и различных видов керамики и фильтров для очистки воды [17–20].

Пироксениты входят в состав пород переходной зоны (между зоной габброидов и зоной ультраосновных пород – перидотитов

Таблица 2. Свойства теплоизоляционной форстеритовой керамики

Состав	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Влагостойкость, %
1	19,94	0,032	0,086
2	12,87	0,025	0,09
3	24,66	0,028	0,091
Известный	1,6	0,07	2,9

Таблица 3. Химический состав пироксенитов

Оксиды	А-308	А-308-г	А-311	Скв. № 817
SiO ₂	50,5	49,8	47,4	50,63
TiO ₂	0,26	0,28	0,27	0,27
Al ₂ O ₃	1,5	1,05	1,57	3,24
Fe ₂ O ₃	1,9	2,13	4,28	7,50
FeO	4,59	4,88	4,17	5,89
MnO	0,163	0,146	0,183	0,157
MgO	21,8	23,37	22,54	18
CaO	15,3	14,21	12,05	14,9
Na ₂ O	0,37	0,33	0,35	0,6
K ₂ O	<0,01	<0,01	<0,02	<0,07
H ₂ O	0,47	0,35	1,14	0,26
П.п.п.	2,51	2,85	5,06	4,03

Примечание. Анализы выполнены в химической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН.

и дунитов) мощностью порядка 400 м. Они окаймляют центральную часть Аганозерского блока, располагаясь по разрезу над серпентинитами (см. рис. 1). В табл. 3 приведены химические составы пироксенитов. Для исследования отобраны пробы из пироксенитов коренных выходов (А-308, А-308-г, А-311) и керна скважины № 817 в северной части Аганозерской площади, вмещающих хромитовое оруденение Главного хромитового горизонта. Данные пробы относятся к Са-Мg-пироксенитам. На рис. 4 приведены микроструктуры проб пироксенитов. Во всех пробах основными минералами пироксенового ряда являются авгит и энстатит, присутствуют оливин и редкие зерна хромита.

По результатам рентгенофазового анализа и данным химического анализа установлена массовая доля основных минералов в пробе 308-г, %: авгита – 67,2; форстерита – 4,3; энстатита – 23,7; серпентина – 4,8.

Пироксениты практического применения в промышленности в настоящее время не получили, но известны теоретические разработки и возможные области их использования [18, 21]. Отмечено, что пироксениты как магнезиальные силикаты могут служить нетрадиционным сырьем для изготовления различных строительных материалов, в том числе строительной облицовочной керамики, тепло- и звукоизоляционных материалов, пигментов.

Заключение

Ультрамафиты Аганозерского месторождения хромовых руд представляют практический интерес как высокомагнезиальное

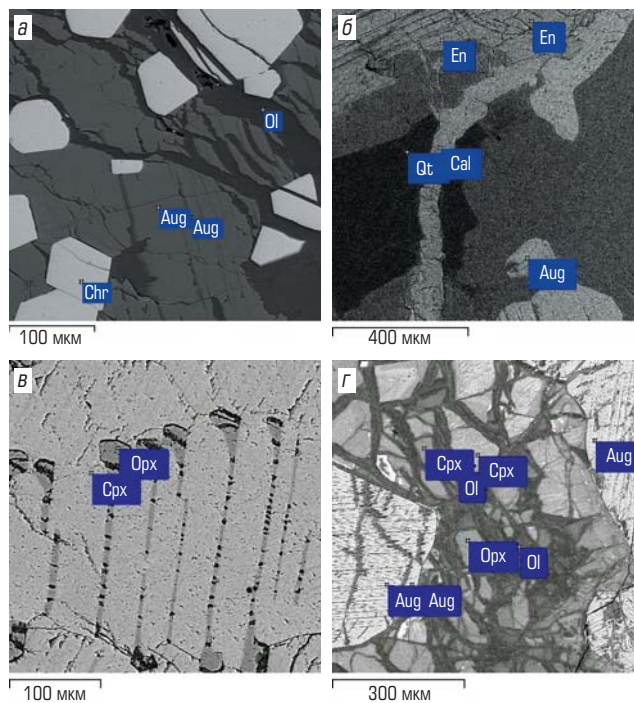


Рис. 4. Микроструктура проб пироксенитов Аганозерского месторождения:


а – А-308-г; б – СКВ. № 817; в – А-308; г – А-311. Aug – авгит, Ol – оливин, Chr – хромит, Qtz – кварц, Cal – кальцит, En – энстатит, Орх – ортопироксен, Срх – клинопироксен

сырьем для использования в промышленности. Определенным толчком может послужить программа по оценке и развитию минерально-сырьевой базы Пудожгорского района, так называемый Пудожгорский мегапроект. Представлены первые результаты исследований высокомагнезиальных пород и минералов для создания новых дефицитных материалов. Дуниты благодаря отсутствию химически связанной воды являются наиболее ценным сырьем для производства форстеритовых огнеупоров. Проведены исследования возможного применения серпентинита и кемистита для получения пористого теплоизоляционного материала, разных видов керамики, антифрикционных покрытий металлов. На основе пироксенитов разработаны составы малоусадочных облицовочных и фасадных плиток с высокой прочностью. Комплексное использование полезных ископаемых при разработке Аганозерского месторождения хромовых руд укрепит экономику Республики Карелия.

Библиографический список

1. Минерально-сырьевая база Республики Карелия / под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. – Петрозаводск: Карелия, 2006. Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. – 356 с.
2. Лавров М. М., Трофимов Н. Н., Голубев А. И., Слюсарев В. Д. Геология и петрология Бураковского расслоенного интрузива // Отечественная геология. 2004. № 2. С. 23–30.
3. Лавров М. М., Голубев А. И., Трофимов Н. Н. Геохимия и рудоносность Бураковского расслоенного интрузива // Геология и полезные ископаемые Карелии: сб. ст. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. Вып. 7. С. 75–91.

4. Kauppila P. M., Lehtonen M., Heino N. Optimisation of raw material potential and environmental properties of tailings: an operational model // Geological Survey of Finland. 2018. Vol. 408. P. 97–108.
5. Sherfy M. H. U.S. Geological Survey – Northern Prairie Wildlife Research Center: 2017 Research Activity Report. – Reston: U.S. Geological Survey, 2017. Circular 1451. – 63 p.
6. Parbhakar-Fox A., Lottermoser B. G. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices // Minerals Engineering. 2015. Vol. 82. P. 107–124.
7. Mikkola P. Kalliiperäkarttatietokannan päivitys Nunnanlahden alueelta: Arkistoraportti / Geologian tutkimuskeskus, 2015. URL: http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/22_2015.pdf (дата обращения: 19.12.2018).

8. Щипцов В. В. Магнезиальное сырье: история, мировой потенциал и ресурсы Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии : сб. ст. — Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2012. Вып. 15. С. 45–61.
9. Горюшко А. Ф. Новый геолого-промышленный тип месторождений комплексного никель-магнезиального сырья в ультрамафитах Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии : сб. ст. — Петрозаводск : КарНЦ РАН, 1998. Вып. 1. С. 24–35.
10. Вакалова Т. В., Говорова Л. П., Горбатенко В. В., Промохов В. В. Структурно-фазовые изменения при нагревании дунитовых пород Северного Урала // Новые огнеупоры. 2016. № 2. С. 6–11.
11. Кевлич В. И. Особенности выделения акцессорного хромита, оливина и пироксена из коматиитов // Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья : сб. ст. X Российского семинара по технологической минералогии. — Петрозаводск : КарНЦ РАН РАН, 2016. С. 119–125.
12. Хорошавин Л. Б. Форстерит: $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$. — М.: Теплотехник, 2004. — 368 с.
13. Щипцов В. В., Ильина В. П., Попова Т. В., Фролов П. В. Высокомагнезиальные промышленные минералы и горные породы Карелии в потенциальном производстве огнеупоров и керамических материалов различного назначения // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 4-5. С. 40–46.
14. Ilyina V. P., Frolov P. V. Utilization of host rocks, e.g. serpentinite, recovered upon the integrated mining of a deposit // Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. — Albena, 2016. Book 1. Vol. 2. P. 987–993.
15. Гурьева В. А., Прокофьева В. В. Строительная керамика на основе композиции техногенного серпентинитового сырья и низкосортных глин // Строительные материалы. 2012. № 8. С. 20–21.
16. Бегларян А. А., Зулумян Н. О., Исаакян А. Р., Габриелян А. А., Терзян А. М. Исследование поведения дунитового серпентина при термоллизе // Химический журнал Армении. 2015. Т. 68. № 2. С. 214–225.
17. Гривенюк В. М., Кошевой Ю. Н. Применение горных пород и минералов в производстве строительных материалов : учеб. пособие. — Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2017. — 100 с.
18. Пат. 2269553 РФ. Неорганический пигмент на основе пироксенов и способ его получения / Н. И. Радишевская, Л. А. Егорова, А. Ю. Чапская, Е. Ю. Егорова, В. И. Верещагин ; заявл. 13.05.2004 ; опубл. 10.02.2006, Бюл. № 4.
19. Бур А., Брукхауз Р., Фандрих Р., Даннерт К. Тенденции развития технологии производства стали высокой чистоты и огнеупорного производства // Черные металлы. 2017. № 4. С. 29–37.
20. Шаповалов А. Н., Овчинникова Е. В., Майстренко Н. А. Влияние вида магнезиальных материалов на показатели агломерационного процесса в условиях АО «Уральская сталь» // Черные металлы. 2018. № 11. С. 38–42.
21. Ильина В. П., Инина И. С., Фролов П. В. Керамическая масса на основе пироксена и легкоплавкой глины // Стекло и керамика. 2016. № 10. С. 15–18. 

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 3, pp. 83–87
DOI: 10.17580/gzh.2019.03.16

Application of high-magnesian ultramafites of the Aganozersky chrome ore deposit in the production of refractory and ceramic materials

Information about authors

V. P. Ilyina¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, ilyina@igkrc.ru

P. V. Frolov¹, Researcher

¹Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Karelia

Abstract

The results of the investigation of high-magnesian ultramafites of the Aganozersky chrome ore deposit in the Republic of Karelia and the field of their application are presented. The deposit belongs to complex objects. In addition to the extraction of chromium ores, prospective minerals include magnesium ultramafites-olivinites, dunites, serpentinites and pyroxenites. At a considerable thickness of high-magnesian dunites, the content of MgO in them varies within the limits of 36.97–46.77%. Dunit Aganozera is a good raw material for refractory materials: refractory bricks, lining of steel stoves and others. At the deposit, the upper horizon of serpentinites (20–70 m) is represented by massive rocks, the deeper horizons are loose varieties (kemistites). The massive varieties and kemistites have similar mineral and chemical compositions. The X-ray phase analysis and electron microscopy show that kemistites are mostly composed of serpentine (lizardite prevails—78%), with magnesium bicarbonate, chlorite, talk, carbonates (calcite, magnesite, siderite), biotite, magnetite, chromite, sulphides and hydrohematite. Based on serpentinites, compositions of porous heat-insulating material, various types of ceramics (forsterite, cordierite, etc.), antifirction coatings of metals and magnesium-silicate agene for heavy metal removal from solutions have been developed. Thick bodies of pyroxenite are discovered in the deposit. Pyroxenites occur in the transition zone (in-between gabbro and ultrabasic rocks—peridotites and dunites) round 400 m thick. Pyroxenites are used to manufacture shrink-resistant facing plates and lining of high strength. Multi-purpose use of Aganozersky chrome ore deposit minerals will economically strengthen Republic of Karelia.

Keywords:

References

1. Mikhailov V. P., Aminov V. N. (Eds.). Mineral and raw material base of the Republic Karelia. Petrozavodsk : Kareliya, 2006. Book 2: Non-metallic mineral resources. Underground waters and medical muds. 356 p.
2. Lavrov M. M., Trofimov N. N., Golubev A. I., Slyusarev V. D. Geology and petrology of Burakovsky layered intrusive. *Otechestvennaya geologiya*. 2004. No. 2. pp. 23–30.
3. Lavrov M. M., Golubev A. I., Trofimov N. N. Geochemistry and ore content of Burakov laminated intrusion. *Geology and Minerals of Karelia : Collected Works*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2004. Iss. 7. pp. 75–91.
4. Kauppila P. M., Lehtonen M., Heino N. Optimisation of raw material potential and environmental properties of tailings: an operational model. *Geological Survey of Finland*. 2018. Vol. 408. pp. 97–108.

5. Sherfy M. H. U.S. Geological Survey – Northern Prairie Wildlife Research Center: 2017 Research Activity Report. Reston : U.S. Geological Survey, 2017. Circular 1451. 63 p.
6. Parbhakar-Fox A., Lottemoser B. G. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 82. pp. 107–124.
7. Mikkola P. Kallioperäkattatietokannan päivitys Nunnanlahden alueelta : Arkistoraportti / Geologian tutkimuskeskus, 2015. Available at: http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/22_2015.pdf (accessed: 19.12.2018).
8. Shchiptsov V. V. Magnesium raw material: History, world potential and reserves in Karelia. *Geology and Minerals of Karelia : Collected Works*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2012. Iss. 15. pp. 45–61.
9. Goroshko A. F. New industrial geology type of complex nickel–magnesium deposits in ultramafic rock mass in Karelia. *Geology and Minerals of Karelia : Collected Works*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 1998. Iss. 1. pp. 24–35.
10. Vakalova T. V., Govorova L. P., Gorbatenko V. V., Promokhov V. V. Structure and phase transformations of the North Ural's dunite-bearing rocks when heated. *Novye ognepurny*. 2016. No. 2. pp. 6–11.
11. Kevlich V. I. Extraction of accessory chromite, olivine and pyroxene from komatiites. *Technological Mineralogy Role in Final Products of Mineral processing : Proceedings of X Russian Workshop on Technological Mineralogy*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2016. pp. 119–125.
12. Khoroshavin L. B. Forsterite: $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$. Moscow : Teplotekhnika, 2004. 368 p.
13. Shchiptsov V. V., Ilyina V. P., Popova T. V., Frolov P. V. High-Mg industrial minerals and rocks of Karelia in potential production of multi-purpose refractory and ceramic materials. *Refraactories and Industrial Ceramics*. 2013. No. 4-5. pp. 40–46.
14. Ilyina V. P., Frolov P. V. Utilization of host rocks, e.g. serpentinite, recovered upon the integrated mining of a deposit. *Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Albena, 2016. Book 1, Vol. 2. pp. 987–993.
15. Gurieva V. A., Prokofieva V. V. Building Ceramic on the Basis of Composition of Anthropogenic Serpentine Raw Material and Low-Grade Clays. *Stroitelnye Materialy*. 2012. No. 8. pp. 20–21.
16. Beglaryan A. A., Zulumyan N. O., Isaakyan A. R., Gabrielyan A. A., Terzyan A. M. The investigation of the behavior of serpentine from dunite upon thermolysis. *Khimicheskii zhurnal Armenii*. 2015. Vol. 68, No. 2. pp. 214–225.
17. Grivenyuk V. M., Koshevoi Yu. N. Application of rocks and minerals in manufacture of building materials : Teaching aid. Yekaterinburg : Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2017. 100 p.
18. Radishevskaya N. I., Egorova L. A., Chapskaya A. Ju., Egorova E. Ju., Vereshchagin V. I. Pyroxenes-based inorganic pigment and a method for preparation thereof. Patent RF, No. 2269553. Applied: 13.05.2004. Published: 10.02.2006. Bulletin No. 4.
19. Buhf A., Bruckhaus R., Fandrich R., Dannert Ch. The tendencies of the development of steel production technology with high purity and manufacture of refractories. *Chernye Metally*. 2017. No. 4. pp. 29–37.
20. Shapovalov A. N., Ovchinnikova E. V., Maystrenko N. A. Effect of the type of magnesia materials on the sintering process indicators at «Ural Steel» JSC. *Chernye Metally*. 2018. No. 11. pp. 38–42.
21. Ilyina V. P., Inina I. S., Frolov P. V. Ceramic Mix Based on Pyroxenite and Low-Melting Clay. *Glass and Ceramics*. 2017. Vol. 73, Iss. 9-10. pp. 365–368.