

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАЦИОННЫХ ТИПОВ СЕРПЕНТИНИТОВ КАРЕЛИИ

Фролов П.В., Лебедева Г.А., Ильина В.П., Попова Т.В., Соколов В.И.

Учреждение Российской академии наук Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск

Введение

Серпентинсодержащие породы представляют собой комплексное минеральное сырье. Существующие в настоящее время технологии позволяют использовать как серпентиниты, так и продукты их переработки в металлургической, огнеупорной, стекольной, керамической, химической и других отраслях промышленности, триботехнике, а также в сельском хозяйстве.

Целью данной работы является изучение серпентиновых пород Карелии различных формационных типов и предварительная их геологическая и минералого-технологическая оценка для выявления областей практического применения. Рассматриваются серпентинизированные ультрамафиты объектов Аганозеро, Светлоозеро, Хаутаваара, Вожемский участок, Таловейс, термообработанные серпентиниты массива Ханкус и участка Кропотнаволоок (рис. 1).

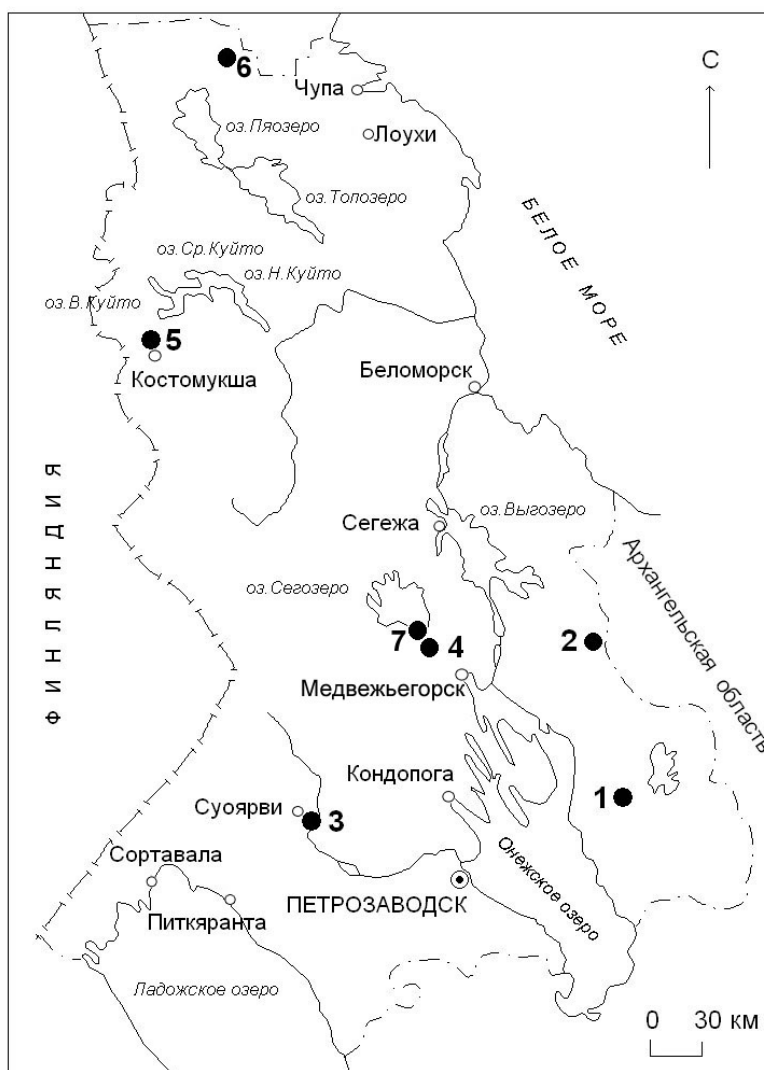


Рис. 1. Схема размещения участков серпентинизированных ультрамафитов: 1 – Аганозеро, 2 – Светлоозеро, 3 – Хаутаваара, 4 – Вожемское, 5 – Таловейс, 6 – Ханкус, 7 – Кропотнаволоок

Серпентин и его свойства

Серпентиновые минералы относятся к группе водных силикатов магния и отвечают химической формуле $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [6]. По кристаллической структуре серпентин относится к сложным минералам. Основные минералы группы: хризотил, лизардит, антигорит. Имеют, главным образом, структурные различия,

в ряде случаев определяющие области практического использования. Содержание окислов в серпентине следующее, вес. %: MgO - 43,0; SiO₂ - 44,1 и H₂O - 12,9; соотношение между компонентами колеблется в незначительных пределах. В виде примесей всегда присутствуют окислы железа FeO и Fe₂O₃, а также NiO. Цвет серпентина от темно-зеленого до зеленовато-черного, твердость 2,4-3,0, плотность 2,5-2,7 г/см³, прочность на сжатие порядка 400-625 кг/см². Серпентин обладает способностью удерживать 10-13% химически связанной воды при высоких температурах (~до 500°C).

Формационные типы

Серпентинсодержащие породы распространены в Карелии, являясь продуктами аутометаморфического и метасоматического преобразования мафит-ультрамафитов гранит-зеленокаменной области Карельского кратона. По генезису серпентиниты подразделяются на следующие формационные типы: серпентинизированные ультрамафиты *эффузивной* (лавовой) и *интрузивной* (расслоенные и недифференцированные интрузии) фаций магматизма.

Значительное распространение имеют серпентинизированные коматииты, так как ультраосновные лавы являются основой геологических разрезов зеленокаменных структур. К таким объектам относятся серпентиниты Костомукшской структуры, Вожемское проявление, объект Кропотнаволоок Сегозерской площади, серпентинизированные перидотитовые коматииты Хаутаваарской структуры и другие, к ним также можно относить серпентиниты Светлоозерской субвулканической интрузии Каменноозерской структуры Восточной Карелии.

Серпентиниты эффузивной фации ультрамафитов в ряде случаев являются вмещающими породами для медно-никелевых проявлений, залежей талькового сырья (Светлоозерский объект и другие).

Аганозерско-Бураковский массив является типичным представителем ультрамафит-мафитовых расслоенных интрузий, распространенных в восточной части Фенноскандинавского щита. Несет хромовую и платиновую минерализацию.

Зеленокаменные структуры могут включать недифференцированные интрузии ультраосновного состава, как правило, серпентинизированные. Примером является пластовая интрузия в районе озера Ханкусъярви Лоухского района (массив Ханкус). Мелкомасштабные тела имеют место в пределах Костомукшской, Каменноозерской и других структур.

Общие геологические сведения об объектах

Ультрамафиты нижнепротерозойской Аганозерско-Бураковской расслоенной интрузии являются вмещающими породами, в первую очередь, для хромовых руд. Серпентиниты Аганозерского массива залегают в основании хромитового горизонта на глубину до 900 м. Верхний горизонт серпентинитов Аганозерского массива (20-70 м) представлен массивными породами, более глубокие горизонты - рыхлыми разностями (кемиститами). Размер интрузива 50×13-16 км, глубина залегания подошвы до 3,5-7 км, форма лополитообразная, овальная, внутреннее строение синклиналиподобное (рис. 2). Характерна высокая степень дифференцированности и присутствие стратиформных хромитовых залежей. Выделяется пять зон пород расслоенной серии (сверху вниз): магнетитовых габбро-диоритов, габбровая, габброноритовая, переходная, ультрамафитовая. Возраст интрузива 2,45 млн. лет [11].

Светлоозерская субвулканическая интрузия, площадью около 9 км², располагается в южной части Каменноозерской верхнеархейской зеленокаменной структуры. Интрузия относится к Вожминской группе никеленосных дифференцированных массивов лопия, приуроченных к основанию верхнеархейской осадочно-вулканогенной толщии вожминской серии - кумбуксинской свите. В составе последней широко развиты горизонты ультраосновных лав, являющиеся, вероятно, комагматами таких массивов. Светлоозерская субвулканическая интрузия представлена Западно-Светлоозерским и Восточно-Светлоозерским массивами (рис. 3). На современном денудационном срезе они находятся на расстоянии до 0,8 км друг от друга и разделяются дислоцированной толщей туффилов средне-кислого состава. На глубине восточная часть интрузии соединяется с западной, где, вероятно, находится ее корневая часть - магноподводящий канал. В обрамлении обоих массивов установлены горизонты коматиитов [16, 20].

В разрезах зеленокаменных структур Ведлозерско-Сегозерского верхнеархейского пояса преобладают вулканические коматиит-базальтовой и известково-щелочной серии, формирующие вулканические постройки центрального типа [2]. Часть разреза Хаутаваарской структуры наблюдается в отдельных обнажениях в районе ж/д станции Хаутаваара (Суоярвский район) (рис. 4). Эффузивная фация представлена семью потоками лав перидотитовых, базальтовых коматиитов и их туфами [4]. *Перидотитовые коматииты серпентинизированы.* Породы в целом однородные, зеленовато-синевато-серые, с поверхности до коричневатобурых, тонкозернистые массивные, с зонами карбонатизации. В вертикальных стенках обнажений характерна поверхность "хлебной корки".

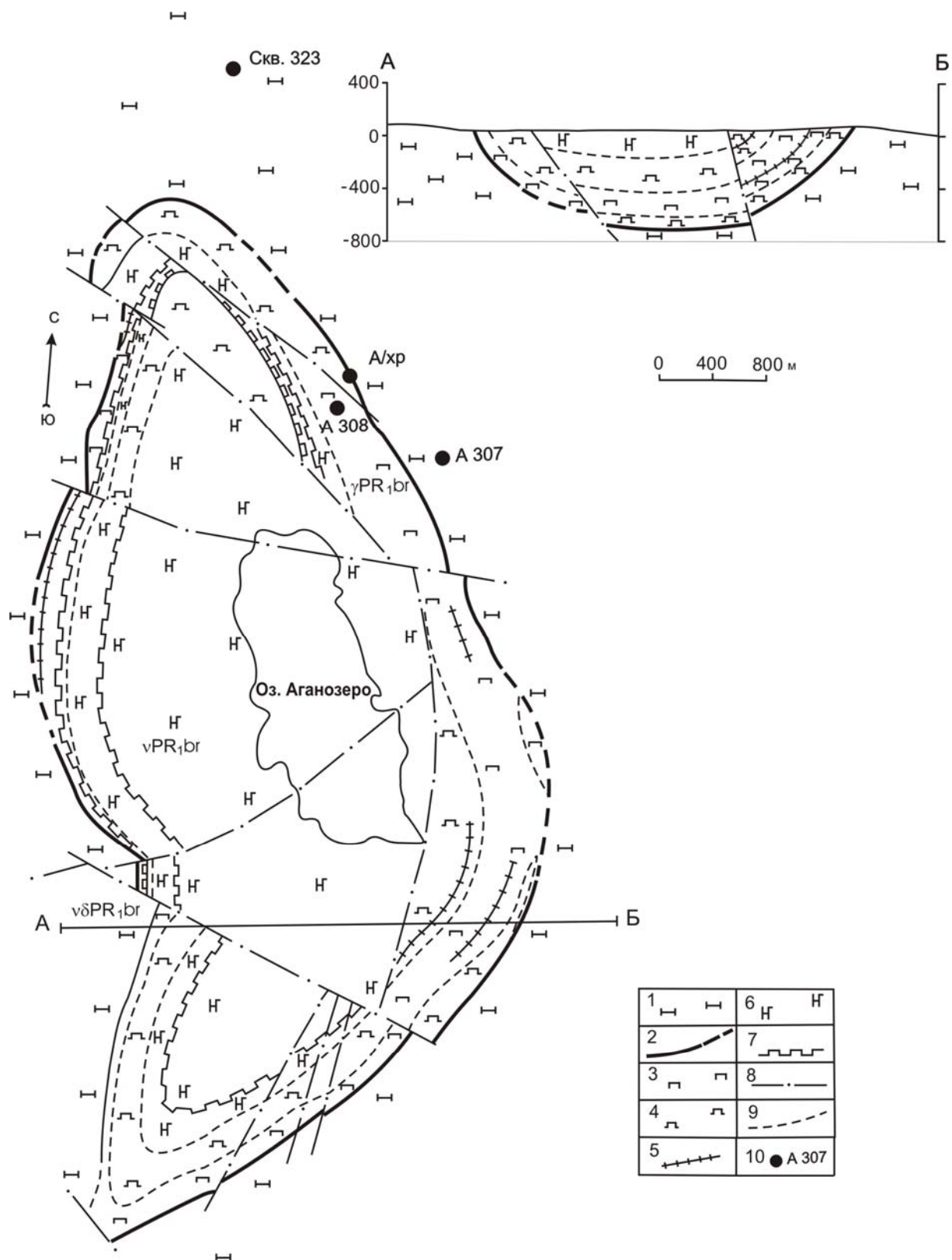


Рис. 2. Схематический геологический план Аганозерского месторождения хромовых руд (Логинов, 1995 [14]), схематический геологический разрез по линии А-Б: нижний протерозой, бураковский комплекс расслоенных интрузий: 1 - ультраосновная зона, перидотиты, 2 – главный хромитовый горизонт (ГХК) в кровле; пироксенитовая зона, клинопироксениты, в т.ч.: 3 - оливиновые, 4 - вебстериты, 5 - прослои верлитов; габброноритовая зона: 6 - габбронориты, 7 - горизонты и линзы вебстеритов; 8 - тектонические нарушения; 9 - геологические границы; 10 - места отбора проб и номера

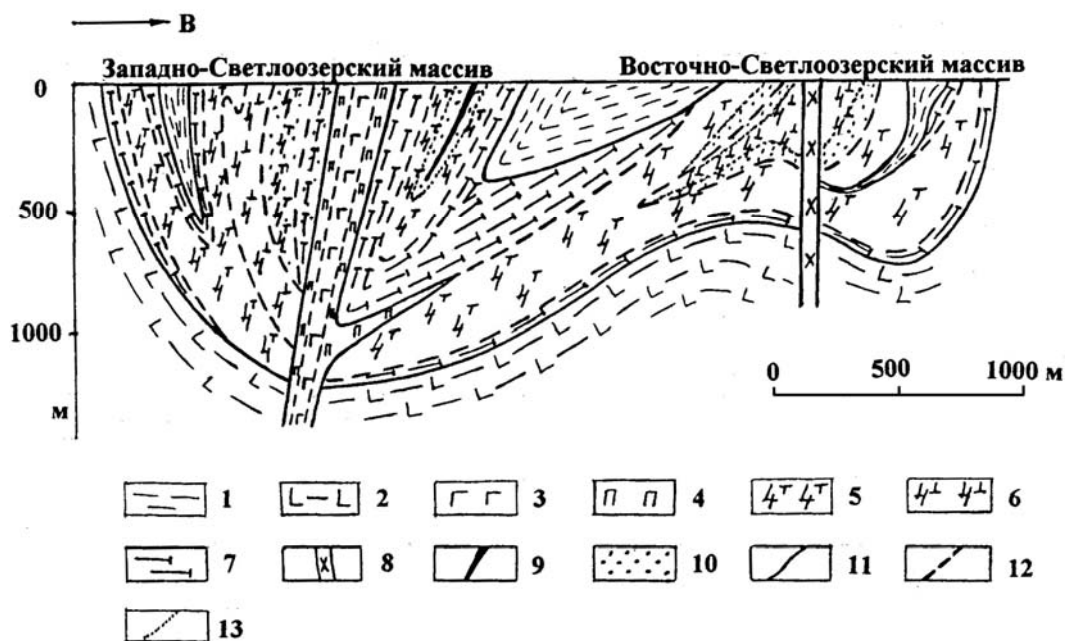


Рис. 3. Схема палеорекострукции Светлоозерской субвулканической интрузии, разрез (составлена по данным В. Н. Фурмана, 1989 г. [19]): 1 - эффузивы, туфы и туффиты кислого состава с подчиненными горизонтами пород средне-основного состава; 2 - сланцеватые и массивные метабазалты коматиитового и толеитового ряда, горизонты измененных перидотитовых коматиитов, туфов основного состава, углеродистых сланцев; 3 - метагаббро; 4 - метапироксениты; 5 - серпентиниты апоперидотитовые преимущественно антигоритового состава; 6 - серпентиниты аподунитовые преимущественно лизардитового состава; 7 - интенсивно измененные ультрамафиты: тальк-карбонатные, карбонат-тальковые, серпентин-карбонат-тальковые, хлорит-тальковые породы, в Восточно-Светлоозерском массиве - со значительными содержаниями тремолита и антофиллита; 8 - дайка субщелочных диоритов; 9 - рядовые прожилковые, прожилково-вкрапленные медно-никелевые руды со средним содержанием никеля по отдельным сечениям более 0,5%; 10 - бедные вкрапленные медно-никелевые руды с содержанием никеля более 0,3%; 11 - границы между разновозрастными породами; 12 - границы между одновозрастными породами; 13 - границы зон вкрапленной минерализации с содержанием никеля более 0,3%

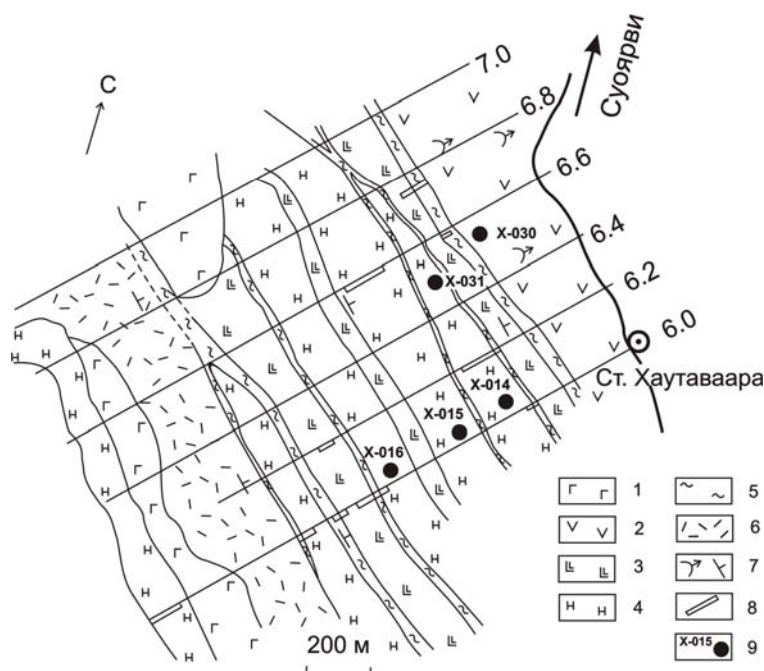


Рис. 4. Геологическая схема участка Хаутаваара (по данным С. А. Светова [4]): 1 - габбро; 2 - пироксенитовые коматииты; 3 - коматиитовые базальты; 4 - перидотитовые коматииты; 5 - графитистые сланцы; 6 - туфы коматиитов, туффиты; 7 - элементы залегания; 8 - каналы; 9 - места отбора проб и номера

На Сегозерской площади (верхнеархейская Сегозерская блоковая структура) имеют место ряд проявлений талькового камня. Одно из них - Вожемское. Вожемский участок расположен в пределах Сайозерской архейской зеленокаменной структуры [18]. Структура сложена осадочно-вулканогенными образованиями семчереченской толщи парандовской серии. Толща залегает среди гранитоидов, представлена амфиболитами, базальтами и серпентинитами. Породы основного состава при картировании выделяются магнитным полем интенсивностью до 1000 нТл. Ультраосновные породы образуют пластообразные крутопадающие (70-90°) тела, сложенные в основном серпентинитами, характеризуются линейно-вытянутыми сильно изрезанными положительными магнитными аномалиями интенсивностью до 14000 нТл. Они переслаиваются с metabазальтами и формируют совместно с ними субмеридионально ориентированные полосы шириной до 1 км. Одна из таких полос была ранее отмечена на Вожемском участке при проведении наземной магнитной съемки. На ней выделена продуктивная полоса ультрамафитов (6×0,8 км), с которой связаны зоны оталькования и залежи тальк-хлоритовых пород. Эта полоса разбита субширотными разломами на отдельные блоки, смещенные относительно друг друга. В пределах указанной полосы выделены три залежи горшечного камня (тальк-карбонат-хлоритовые породы), которые отличаются содержанием талька, хлорита, амфибола и серпентина. Вмещающими для талькосодержащих образований породами являются серпентиновые породы. Изучается возможность получения блочного камня из оталькованных серпентинитов, имеющих хорошие декоративные свойства.

Костомукшская верхнеархейская зеленокаменная структура расположена в западной части Западно-Карельской структурно-формационной зоны. Структура вытянута по длинной оси в северо-восточном направлении более чем на 20 км. Она отличается наиболее полным комплексом лопийских супракрустальных образований. По В.Н. Кожевникову, породы супракрустального комплекса подразделяются на две группы [9]:

1 - ранняя мафическая стратотектоническая ассоциация с возрастом 2849 ± 39 млн. лет, представлена толеитовыми metabазальтами и метакоматиитами (ниемиярвинская и рувинварская свиты);

2 - поздняя - гимольская стратотектоническая ассоциация с возрастом 2795 ± 29 млн. лет, включает кислые вулканогенные, железисто-кремнистые и терригенные образования (нюкозерская толща, шурловарская, суккозерская, костомукшская и сурлампинская свиты).

Юго-западная часть Костомукшской зеленокаменной структуры сложена мафическим и вулканогенно-осадочным комплексами, южное и восточное ее обрамление представлено массивами гранитоидов. Значительную роль в разрезе играют ультраосновные вулканы, не имеющие широкого развития за пределами указанной части структуры. Супракрустальные образования исследуемой площади по составу, пространственному положению и данным определения абсолютного возраста подразделяются на три толщ: базальтовая, ультраосновная (мафическая СТА), железисто-кремнистая сланцевая (гимольская СТА) [17]. Серпентиновые породы участка Таловейс могут быть одним из видов полезного ископаемого комплексного объекта.

Массив Ханкус представляет собой пластовую интрузию ультрамафитов, смятую вместе с вмещающими породами в синклиналию складку. Общая площадь массива около 4 км². В строении проявлена метаморфическая зональность. Контактная зона представлена каймой хлорит-амфиболовых и карбонатных пород мощностью до нескольких метров. К центру массива породы сменяются 20-100-метровой зоной серпентинитов. Центральная часть сложена гарцбургитами и оливинитами [10]. Серпентиниты зеленовато-светло-серые массивные среднезернистые, с прожилками асбеста. В минеральном составе присутствуют округлые зерна оливина (5-10%) [15].

В западной части мыса Кропотнаволок южного побережья оз.Сегозеро имеет место резкий прямолинейный контакт сильно рассланцованных тальцитов (где талька около 85%, с хлоритом и карбонатами) с вмещающими их серпентинитами. Таким образом, на объекте Кропотнаволок произошла серпентинизация при аутометаморфизме перидотитовых коматиитов; талькообразование происходило впоследствии по серпентинитам.

Области применения и требования к сырью

На основании патентного поиска, обзора литературы, собственных исследований представлены широкие возможности применения серпентиновых пород (рис. 5).

Возможность использования серпентинитов в различных направлениях определяется постоянством состава, содержанием сопутствующих минералов - магнетита, хлоритов, слюд, карбонатов, определяющих химический состав сырья, а также структурой и агрегатным состоянием серпентиновых минералов. Наиболее однородными по составу и наиболее благоприятными для практического использования являются серпентиниты с минимальным количеством примесей [12].

Для получения огнеупоров и электрокерамики отрицательное воздействие оказывает присутствие в сырье оксидов кальция, алюминия, железа, снижающих огнеупорность и электросопротивление. Вредны примеси карбонатов кальция и хлоритов [1].

Исходя из ТУ, разработанных для серпентин-магнезиальных пород Халиловского железорудного месторождения (Оренбургская область), определены требования к серпентинитам для ряда областей применения [1, 5, 13] (табл. 1).

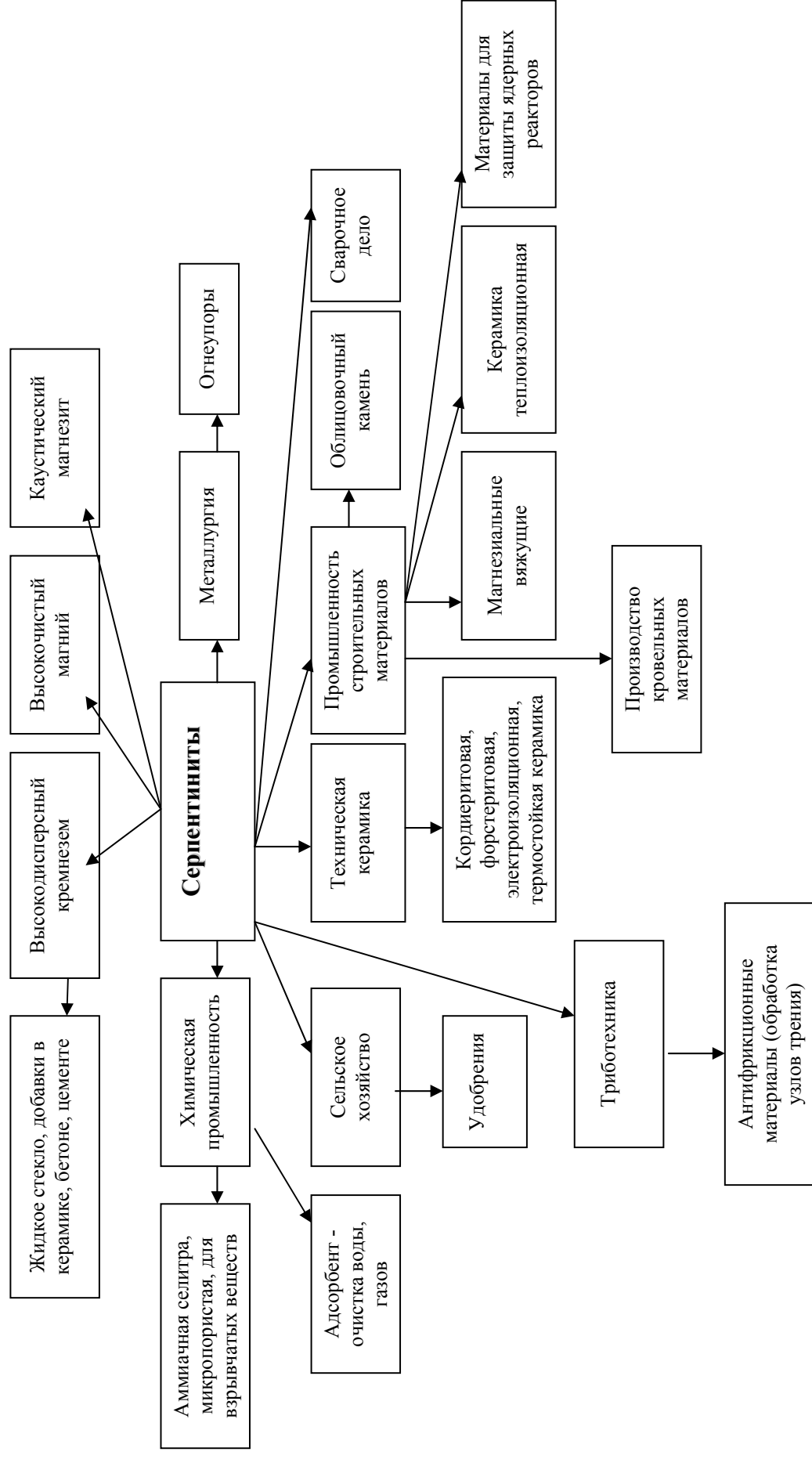


Рис. 5. Области промышленного использования серпентинитов

Таблица 1. Требования к химическому составу сырья для различных областей использования (мас.%)

Область применения	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	FeO+Fe ₂ O ₃	п.п.п.	H ₂ O
Форстеритовые огнеупоры	1,5-2	2-3			Не более 6		
Кордиеритовая электрокерамика	0,5-0,8				3,5		
Материалы для металлургии	Не более 2		Не более 38	Не менее 38	Не более 5	Не более 18	
Материалы для биологической защиты ядерных реакторов: засыпка, заполнитель бетона							Не менее 7 Не менее 9-10
Адсорбенты для очистки воды и газов	Не более 2		Не менее 30	Не менее 35	Не более 5	Не более 18	

Например, серпентинит, используемый в качестве биологической защиты ядерных реакторов, должен содержать не менее 7% кристаллизационной воды при использовании в виде засыпки и не менее 9-10% - при использовании его как заполнителя в бетоне. Кроме того, в отличие от других областей применения, большое количество железа в серпентините, используемом в качестве заполнителя бетона, не является недостатком. "Железосерпентиновый" бетон обладает более высоким объемным весом, повышенными защитными свойствами и сохраняет работоспособность при высоких температурах [5].

Режим обжига сырья при производстве термоактивированного серпентинита для получения вяжущих и мелиорантов определяется видом серпентинового минерала, т. к. структурные особенности серпентиновых минералов (хризотила, лизардита, антигорита) влияют на температуру дегидратации.

Минеральный и химический состав исследованных серпентиновых пород

Минеральный состав исследованных пород определен с помощью оптической микроскопии, рентгенофазового анализа, породы дополнительно изучались под электронным микроскопом LSH с приставкой для микроанализа. Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре ARL X'TRA с излучением CuK α в области углов $2\theta=2-90^\circ$; с использованием программы Siroquant для количественного анализа содержания основных минералов в образце. Минеральный состав серпентинитов приведен в табл. 2.

Таблица 2. Минеральный состав серпентинитов

Участок	Минеральный состав
Светлоозеро	Серпентин (преимущественно антигорит) - 70-80%, магнезит, брейнерит - 3-10%, магнетит - 7-10%, пирротин, сульфид никеля, пентландит, титаномагнетит, халькопирит, хромит
Аганозеро, кемистит (средний состав)	Серпентин (преимущественно лизардит) - 78%, карбонаты и гидрокарбонаты - 12%, хлорит, магнетит, хромит, сульфиды железа и никеля
Аганозеро, массивный серпентинит	Серпентин (преимущественно лизардит) - 80-90%, хлорит 5%, магнетит - 5%, апатит, сульфид никеля - ед. зерна
Хаутаваара	Серпентин - 16-30%, хлорит - 28-40%, тремолит - 33-50%, оливин, магнетит, пентландит, хромит
Таловейс	Серпентин - 25-70%, хлорит, тремолит, магнетит, карбонаты
Вожемский	Серпентин - 40%, тремолит - 40%, магнетит - 15%, хлорит, галенит, пирит, пентландит
Ханкус	Серпентин (преимущественно лизардит) – до 80%, оливин – 5-10%, магнетит, хлорит, карбонат
Кропотнаволоок	Серпентин – до 80%, тальк, хлорит, карбонат, магнетит

Наиболее высокие содержания серпентина (70-80%) отмечаются в породах Светлоозерского и Аганозерского участков. Содержание хлорита не превышает 5%, тремолит практически отсутствует. Сопутствуют карбонаты магния, магнетит, сульфиды железа и никеля. Согласно данным дифференциально-термического анализа (рис. 6 в), серпентин в Светлоозерских серпентинитах относится к антигориту, для которого характерен эндоэффект в области 700-830°C и слабый экзоэффект при 850-880°C [7]. В серпентинитах

Аганозерского месторождения серпентин, входящий в состав как массивного серпентинита, так и кемистита, относится к лизардиту, характеризующемуся сильными экзоэффектом при 830-865°C и эндоэффектом при 645-660°C (рис. 6 а, б).

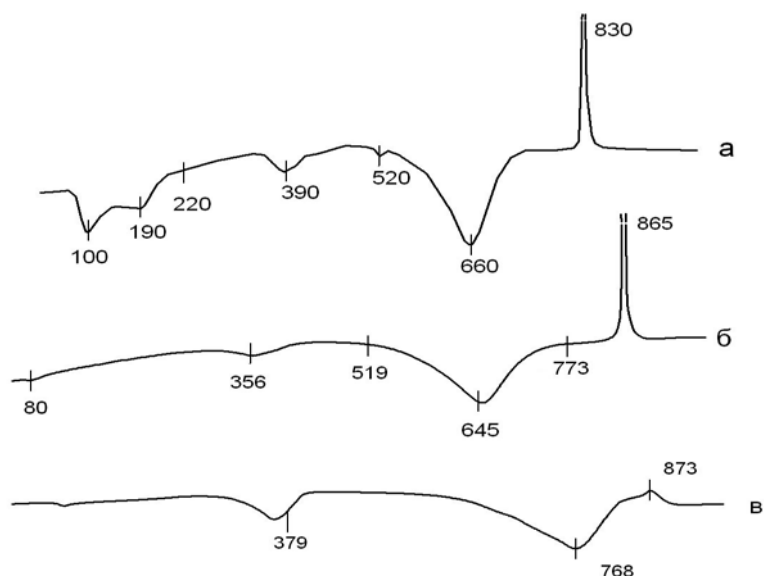


Рис. 6. Дериватограммы серпентинитов: а - кемистит, б - массивный серпентинит Аганозерского объекта; в - серпентинит Светлоозерского объекта

Зерна магнетита в породах Светлоозерского участка имеют размер от 0,01 до 0,4 мм, при этом преобладают наиболее крупные зерна. Магнетит располагается, главным образом, по границам серпентиновых агрегатов (рис. 7 а).

Зерна магнетита в серпентините Аганозера имеют размеры от 0,01 до 0,2 мм, расположены как между агрегатами серпентина, так и внутри них, часто в виде микровключений (рис. 7 б). Размер и характер распределения магнетитовых зерен оказывает влияние на возможность получения из серпентинитов маложелезистых концентратов для огнеупоров и электрокерамики.

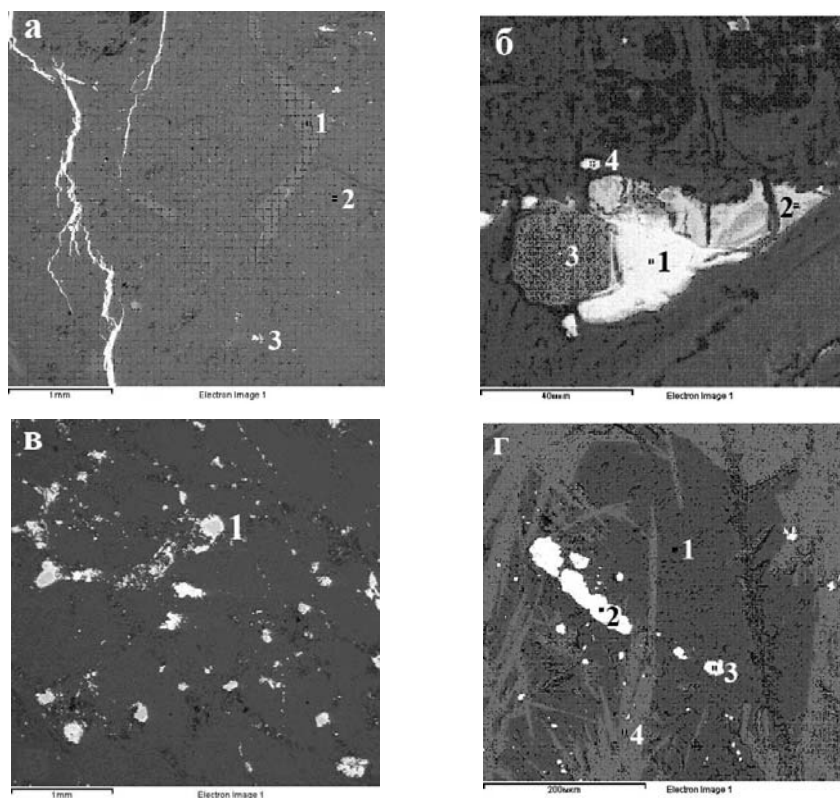


Рис. 7. Электронное изображение включений магнетита в серпентинитах: Аганозеро (а - 1-хлорит, 2-серпентин, 3- магнетит; б – миллерит, 2- магнетит, 3- апатит, 4-пентландит). Светлозеро (в – 1 – магнетит; г - 1- брейнерит, 2,3- магнетит, 4-серпентин

Серпентиновые породы участков Хаутаваара, Таловейс и Вожемского, относящиеся к эффузивной фации ультрамафитов, содержат от 16 до 70% серпентина, с хлоритом, тремолитом, карбонатами. Рудные минералы представлены, главным образом, магнетитом, присутствуют сульфиды железа и никеля.

Различия в минеральном составе исследованных пород отражаются на их химическом составе (табл. 3). Кемиститы и серпентиниты Аганозерского участка наиболее богаты магнием (36-38%) и содержат незначительное количество примесей Al_2O_3 (0,1-0,5%) и CaO (0,24-0,5%). Средний состав Светлоозерских серпентинитов (по 30 пробам) также показывает достаточно высокое содержание MgO (34%) и малое количество примесей Al_2O_3 (0,2-3%) и CaO (0-2%). Породы остальных участков характеризуются более низким содержанием MgO (25,7-35,35%) и значительно более высоким содержанием Al_2O_3 (3-6%) и CaO (2,9-5,8%).

Таблица 3. Химический состав серпентиновых пород, %

Участок	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	Cr_2O_3	NiO	CO_2	п.п.п.
Светлоозеро: (по 8 пробам)	33,7- 37,9	0,08- 0,19	0,21- 3,05	4,6- 8,47	3,33- 7,75	0,09- 0,2	34,38- 38,18	0- 2,04	0,01- 0,03	<0,01	0,03- 0,08	0,3- 0,88	0,17- 0,47	1,31- 4,6	10,6- 14,94
Светлоозеро (среднее по 30 пробам)	32,85	0,05	0,78	12,3		0,64	34,32	0,64							18,41
Аганозеро: массивные серпентиниты (среднее по 16 пробам)	34,06	0,01	0,51	10,02	2,03	0,12	35,69	0,5	0,03	0,02	0,03	0,3	0,38	0,57	17
Аганозеро: кемиститы (среднее по 40 пробам)	32,59	0,02	0,1	9,8	3,78	0,14	37,16	0,24	0,03	0,02	0,03	0,38	0,42	0,66	15,03
Хаутаваара (по 5 пробам)	41,66- 42,6	0,25- 0,31	4,52- 6,12	2,34- 4,75	4,6- 6,4	0,137- 0,174	27,67- 29,59	3,68- 5,81	0,04- 0,13	0,01- 0,04	0,07- 0,11		0,125- 0,16		6,55- 8,17
Таловейс (по 4 пробам)	36,6- 42,4	0,2- 0,35	2,98- 6,59	1,98- 4,8	3,91- 6,46	0,111- 0,134	27,22- 35,35	3,94- 5,4	0,01- 0,06	<0,01	0,02- 0,03	0,19- 0,28	0,176- 0,264	1,11- 7,23	8,34- 11,8
Вожемское (по 2 пробам)	38,28- 42,96	0,22- 0,4	4,33- 5,11	6,55- 6,75	8,76- 8,88	0,147- 0,154	25,68- 26,11	2,93- 5,15	0,01- 0,04	0,01- 0,04	<0,01	0,26	0,16		6,88- 9,91
Ханкус (среднее по 9 пробам)	33,99	0,12	0,50	7,30	2,06	0,19	40,84	-	0,06	-	0,034	0,25	0,20		14,57
Кропотнаволоок (по одной пробе)	39,66	0,24	3,8	3,24	9,41	0,164	32,08	0,49	0,03	-	0,07	-	0,136	-	10,39

Средние составы серпентинитов объектов Светлоозеро, Аганозеро, Ханкус приведены по данным публикаций [3, 16, 10].

Данные по термообработке серпентинитов разных формационных типов

Некоторые перспективные направления использования серпентинитов связаны с возможностью получения материала при термообработке. Для правильной интерпретации результатов изучения свойств термообработанных серпентинитов необходимо знание процессов, происходящих в них при нагревании. Для этой цели проведены рентгенографические исследования природных и термообработанных серпентинитов массива Ханкус (Лоухский район) и участка Кропотнаволоок (Медвежьегорский район) [15]. Образцы в виде порошка получены обжигом серпентинитов при температурах до 1250°C с выдержкой их при фиксированных температурах в течение трех часов. В состав пород входит до 80% серпентина.

Значения коэффициентов теплопроводности природных серпентинитов обоих проявлений близки и составляют приблизительно 2,4 Вт/(м·град).

Физико-механические свойства серпентинитов участка Кропотнаволоок в значительной степени зависят от температуры их обработки (табл. 4). Зависимости показателей плотностных свойств серпентинитов данного месторождения от температуры обработки аналогичны соответствующим зависимостям их для серпентинитов массива Ханкус: с ростом температуры обжига до температур 900-1000°C объемный вес образцов уменьшается, пористость и водопоглощение возрастают, при дальнейшем повышении температуры обработки наблюдается обратная зависимость соответствующих показателей свойств.

Особенностью зависимости теплопроводности серпентинитов проявления Кропотнаволоок от температуры их обжига является то, что при температурах выше 1000°C, при уменьшении пористости, продукты обжига сохраняют низкие значения теплопроводности, в отличие от термообработанных серпентинитов проявления Ханкус.

Для продуктов низкотемпературного обжига серпентинитов (до 500°C) наблюдается зависимость коэффициента теплопроводности от температуры нагрева, характерная для кристаллических тел - уменьшение λ от температуры нагрева. Такая же зависимость наблюдается и для серпентинитов, обожженных при температурах 1200°C и выше.

Для обожженных серпентинитов при температурах 500-1100°C устанавливается зависимость $\lambda=f(t_{\text{н}})$, характерная для аморфных тел, когда увеличивается теплопроводность с ростом температуры нагрева. Математическая обработка результатов зависимостей коэффициента теплопроводности от температуры нагрева показывает, что они, при довольно высоких значениях коэффициентов корреляции R, подчиняются закону:

$$\lambda=A+B \cdot t_{\text{н}},$$

где A и B - постоянные коэффициенты, характеризующие материал;

$t_{\text{н}}$ - температура нагрева.

Угол наклона данных зависимостей к оси температур характеризует степень кристалличности материалов, полученных термообработкой серпентинитов. Для данной прямолинейной зависимости коэффициент "B" (его знак и величина) будет характеризовать соотношение между количеством образовавшихся кристаллической и аморфной фаз (табл. 5). С увеличением температуры обжига до 1000°C содержание аморфной фазы возрастает (степень кристалличности уменьшается), при дальнейшем увеличении температуры обработки серпентинитов степень кристалличности за счет перекристаллизации возрастает. Это указывает на то, что температуры около 1000°C являются наиболее оптимальными для спекания образцов из серпентинитов и мелкие фракции их могут быть использованы для изготовления высокоэффективных изделий методом прессования и последующим обжигом.

Таблица 4. Физико-механические характеристики термообработанных серпентинитов участка Кропотнаволоок

Температура обжига, °C	Объемный вес, г/см ³	Водопоглощение, %	Эффективная пористость, %	Прочность на сжатие, МПа
100	2,76	0,13	0,43	77-114
				93
500	2,76	0,14	0,38	42-141
				75
600	2,77	0,10	0,78	38-84
				63
700	2,58	4,52	11,57	67-124
				80
800	2,54	7,81	19,82	60-163
				94
900	2,53	8,48	21,53	104-200
				148
1000	2,58	9,21	23,68	47-150
				83
1100	2,75	6,07	16,80	40-195
				155
1200	3,00	3,00	9,25	53-160

Таблица 5. Параметры, характеризующие изменение коэффициентов теплопроводности термообработанных серпентинитов массива Ханкус от температуры их нагрева

Параметры	Температура обжига, C							
	25	600	700	800	900	1000	1100	1200
$\lambda_{25}^{\circ\text{C}},$ Вт/(м·°K)	2,41	0,89	0,88	0,85	0,75	0,60	1,38	2,06
$\lambda_{125}^{\circ\text{C}},$ Вт/(м·°K)	2,35	0,96	0,81	0,86	0,79	0,6	1,40	1,95
A	2,44	0,88	0,87	0,84	0,73	0,58	1,98	2,08
$B \cdot 10^{-4}$	-13,72	5,77	4,94	3,91	7,20	6,71	2,11	-7,08
R	0,94	0,99	0,87	0,98	0,99	0,99	0,78	0,79

Примечание: $\lambda_{25}^{\circ\text{C}}$ - определены методом динамического разогрева; $\lambda_{125}^{\circ\text{C}}$ - измерены стационарным сравнительным методом.

Технологические исследования

Особенности минералогического и химического состава обуславливают ограничение для использования серпентинитов эффузивной фации ультрамафитов в целом ряде технологий (получение магнезия, огнеупоров, компонентов шихты в металлургии и др.). Серпентиниты Светлоозерского и Аганозерского месторождений по содержанию MgO , CaO , SiO_2 , Al_2O_3 отвечают требованиям к сырью для огнеупоров, электрокерамики, жаростойких цементов, для использования в металлургии, однако содержат повышенное количество оксидов железа, поэтому применение этих пород в данных направлениях связано с необходимостью получения маложелезистых концентратов.

По содержанию конституционной воды (входящей в состав п.п.п.) серпентиниты данных месторождений пригодны для биологической защиты ядерных реакторов, при этом высокие содержания оксидов железа в них являются положительным фактором.

В ИГ КарНЦ РАН проведены исследования по обогащению серпентинитов Светлоозерского и Аганозерского месторождений. Методом магнитной сепарации из пробы Светлоозерского серпентинита (С-8) получен концентрат, содержащий 3,75% оксидов железа [8]. Из Аганозерского серпентинита и кемистита маложелезистый концентрат получить не удалось вследствие присутствия в зернах серпентинита микровключений магнетита, а также вхождения железа в кристаллическую решетку серпентина (до 6%, по аналитическим данным).

С использованием серпентинового концентрата Светлоозерского месторождения разработан состав и получены образцы кордиеритовой керамики с электроизолирующими свойствами и низким коэффициентом термического расширения. Основные характеристики керамики находятся в пределах требований к пористым кордиеритовым материалам [13]: диэлектрическая проницаемость - 2,97 отн. ед.; удельное электрическое сопротивление - $\rho = 10^{8,1}$ Ом $\times$ см ($\lg \rho = 8,1$); диэлектрические потери - $\tg \delta = 0,04$; плотность - 2,08 г/см³, водопоглощение - 12%; термический коэффициент линейного расширения при нагреве от 20 до 400°C - $TKLP = 1,1 \times 10^{-6}$ °C⁻¹.

Необогащенный кемистит Аганозера применим для получения термостойкой кордиеритовой керамики. Получены образцы керамики со следующими свойствами: плотность - 1,89-2,1 г/см³, пористость открытая - 11,7-21,1%, термостойкость - 1000°C, $TKLP = (2,3-2,6) \times 10^{-6}$ °C⁻¹.

В настоящее время проводятся исследования необогащенных серпентинитов Аганозера в качестве сырья для получения теплоизоляционных материалов для тепловых агрегатов.

В период проведения геологоразведочных работ на Аганозерском месторождении выполнены технологические исследования кемиститов как сырья для получения магнезия и никеля. Среднее содержание NiO в породах составляет 0,38%; он содержится, главным образом, в серпентине, но присутствует также и в других минералах. По содержанию MgO кемиститы приближаются к магнезиту (36-42% и 45-50% соответственно) и являются ценным сырьем высокочистого MgO для металлургии, а также сульфата никеля.

Технологическая схема переработки кемиститовых комплексных никель-магнезиальных руд Аганозерского месторождения включает выщелачивание руды, очистку раствора от железа, сорбцию никеля на ионитах, осаждение сульфата магнезия, его термическое разложение до оксида магнезия. Товарными продуктами являются оксид магнезия (MgO 96-98%) и водный сульфат никеля (Ni 21-27%). Геолого-экономические расчеты предприятия по производству оксида магнезия и никеля ориентировались на производительность карьера по руде 2440 т/год. Выход ценных продуктов: 96-250 кг/т MgO и 11,5 кг/т сульфата никеля [3].

Предварительные исследования серпентинитов Хаутаваары указывают на перспективность их применения для сварочного дела.

Выводы

Таким образом, на основании геологических и минералого-технологических исследований серпентинитов различных формационных типов выявлено, что серпентиниты Аганозерского и Светлоозерского объектов являются наиболее перспективными для получения без обогащения термостойкой керамики, теплоизоляционных строительных материалов, сульфата никеля, оксида магнезия, высокодисперсного кремнезема, мелиорантов, материалов для биологической защиты ядерных реакторов.

Кроме того, обогащенные Светлоозерские серпентиниты могут быть пригодны для получения электроизоляционной керамики, огнеупоров, адсорбентов.

Серпентинсодержащие породы эффузивной фации ультрамафитов ряда объектов (Вожемское, Таловейс, Хаутаваара) имеют ограниченное применение вследствие недостаточно высокого содержания серпентина. Они могут быть использованы в качестве наполнителя строительной керамики, как сварочные материалы, а также для получения плавящихся фосфатно-магнелиевых удобрений, и в качестве декоративного и облицовочного камня.

Серпентинизированные ультрамафиты нередко являются вмещающими для различных полезных ископаемых – медно-никелевых, хромовых руд, золоторудной минерализации, тальковых руд, талькового камня и некоторых других. В таких случаях объекты серпентинсодержащих пород возможно рассматривать как комплексные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будников П.П., Балкевич В.Л. и др. Химическая технология керамики и огнеупоров. М.: изд. литературы по строительству, 1972. 551 с.
2. Вулканические постройки протерозоя Карелии. Л.: Наука, 1978. 154 с.
3. Горошко А.Ф. Новый геолого-промышленный тип месторождений комплексного никель-магнезильного сырья в ультрамафитах Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып.1. Петрозаводск, 1998. С. 24 - 35.
4. Гранит-зеленокаменные системы архея и их поздние аналоги. Материалы научной конференции и путеводитель экскурсий. Петрозаводск, 2009. С. 9–11.
5. Гришин Н.Н., Крашенинников О.Н., Белогурова О.А., Бастрыгина С.В. Огнеупоры и жаростойкие бетоны из сырья Кольского полуострова // Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. С. 206-217.
6. Дир У.А., Хауи Р.А., Дж. Зусман. Пороодообразующие минералы. Том 3. М.: изд. Мир, 1966. 318 с.
7. Иванова В.П., Касатов Б.К. и др. Термический анализ минералов и горных пород Л.: Недра, 1974, 399 с.
8. Каменева Е.Е., Лебедева Г.А., Соколов В.И., Фролов П.В. Исследование вещественного состава и технологических свойств серпентинитов Карелии // Материалы годичного собрания Российского минералогического общества «Современные методы минералого-геохимических исследований как основа выявления новых типов руд и технологии их комплексного освоения». СПб., 2006. С. 22-24.
9. Кожевников В.Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 223 с.
10. Лавров М. М. Гипербазиты и расслоенные перидотит-габбро-норитовые интрузии докембрия Северной Карелии. Л.: «Наука», 1979. 136 с.
11. Лавров М.М., Голубев А.И., Трофимов Н.Н. Геохимия и рудоносность Бураковской расслоенной интрузии. // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 75-92.
12. Макаров В.Н. Минералогические критерии комплексной переработки рудовмещающих гипербазитов. Апатиты, 1989. 94 с.
13. Масленникова Г.Н., Харитонов Ф.Я., Костюков Н.С., Пирогов К.С. Технология электрокерамики. М., 1974. 224 с.
14. Минерально-сырьевая база Республики Карелия / Кн. 1. Горючие полезные ископаемые. Металлические полезные ископаемые / Под ред. В.П. Михайлова, В.Н. Аминова. Петрозаводск: Карелия, 2006. 280 с.
15. Соколов В.И. Влияние термообработки на теплофизические свойства серпентинитов. // Месторождения индустриальных минералов Финляндии: (геология, экономика и новые подходы к переработке и использованию). Петрозаводск, 1999. С. 117–118.
16. Фролов П.В., Фурман В.Н. Светлоозерское проявление руд железистого талька — эталонный объект комплексных месторождений зеленокаменных поясов Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып.6. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 58–66.
17. Фурман В.Н. Отчет о результатах поисковых работ на золото, проведенных в южной части Костомукшской зеленокаменной структуры в 1988-2001 г.г. Петрозаводск: КГЭ, 2001. Фонды КарТФГИ.
18. Фурман В.Н., Афонина Е.Н. Отчет о результатах поисков тальковых руд и тальк-хлоритового камня в Республике Карелия в 1990-1994 г.г. Петрозаводск: КГЭ, 1995. Фонды КарТФГИ.
19. Фурман В.Н. и др. Отчет о результатах поисков медно-никелевых руд, связанных с коматиитами в Каменноозерской структуре за 1985-1989 г.г. Петрозаводск: КГЭ, 1989. Фонды КарТФГИ.
20. Фурман В.Н. и др. Отчет о результатах поисковых и поисково-оценочных работ на карбонат-тальковые руды в пределах Светлоозерского массива ультрамафитов в 1990-1994 г. Петрозаводск: КГЭ, 1995. Фонды КарТФГИ.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ БОКСИТОВ В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Кормищикова З.И.

Сыктывкарский лесной институт, Сыктывкар; zinaida_k@mail.ru

Одними из перспективных материалов настоящего времени считаются керамические материалы, исходными компонентами которых являются тугоплавкие неметаллические соединения с большой долей ковалентной связи. Поэтому керамике присущи высокие показатели упругости, прочности, твердости, износостойкости. Наиболее важными в практическом применении для конструкционных материалов являются керамические материалы на основе оксида алюминия (корундовая керамика). Исходным сырьем для