

О ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГИПЕРБАЗИТОВ, ВМЕЩАЮЩИХ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТ, С КАЧЕСТВОМ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТА (*прочностные характеристики*)

В.В. Бахтерев

Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

Изучены образцы серпентинитов из Баженовского месторождения хризотил-асбеста физическими, физико-химическими, минералого-петрографическими методами. Серпентиниты отличаются минеральным составом, различны по физическим и физико-химическим параметрам, а также по качеству (прочностью на разрыв) связанного с ними хризотил-асбеста. Получены зависимости электрического сопротивления серпентинитов от температуры в интервале 20—800 °С. Установлены параметры высокотемпературной электропроводности (энергия активации E_0 и так называемый коэффициент электрического сопротивления $\lg R_0$). Выявлена связь между прочностью волокна хризотил-асбеста и параметрами высокотемпературной электропроводности вмещающих его серпентинитов. Показано, что поля распределения фигуративных точек исследованных образцов серпентинитов в координатах E_0 , $\lg R_0$, вмещающих ломкий хризотил-асбест и нормальной прочности, не совпадают и не пересекаются друг с другом. Это дает возможность судить о качестве волокна хризотил-асбеста по параметрам высокотемпературной электропроводности вмещающих серпентинитов.

Серпентинизация гипербазитов, электрическое сопротивление, высокая температура, энергия активации, прочность хризотил-асбеста.

QUALITY OF CHRYSOTILE ASBESTOS AND HIGH-TEMPERATURE CONDUCTANCE OF THE HOST ULTRAMAFICS: POSSIBLE LINKAGE

V.V. Bakhterev

The paper reports physical, physicochemical, and mineralogical-petrographic studies of serpentinite samples from the Bazhenovo deposit of chrysotile asbestos. The samples differ in mineralogy, physical and physicochemical parameters, and quality (rupture strength) of the hosted chrysotile asbestos. The experiments allowed estimating the temperature dependence of electrical resistance of serpentinites in the range of 20–800°C, the parameters of their high-temperature resistance (activation energy E_0 and the so-called resistance coefficient $\lg R_0$), and the relationship between the strength of chrysotile asbestos fiber and the parameters of high-temperature conductivity of the host serpentinites. The serpentinite samples that host weak and normal chrysotile asbestos plot different fields in the coordinates E_0 , $\lg R_0$ without any overlap. Thus, the quality of chrysotile asbestos can be inferred from the parameters of high-temperature conductance of the host serpentinites.

Serpentinization of ultramafics, electrical resistance, high temperature, activation energy, strength of chrysotile asbestos

ВВЕДЕНИЕ

Баженовское месторождение хризотил-асбеста приурочено к гипербазитам дунит-гарцбургитовой формации, массивы которой входят в состав перидотитовых поясов, фиксирующих глубинные разломы внутри эвгеосинклинальных зон складчатых областей. Геологии, петрологии и металлогении месторождения посвящена обширная литература, в частности [Штейнберг, Чашухин, 1977; Зырянов, 1979; Баженовское..., 1985; Зырянов др., 1985; Варлаков, 1986; и др.]. Важной генетической особенностью формирования месторождения является изменчивость физико-химического режима и длительность гидротермального процесса, предшествовавшего кристаллизации асбеста. Благодаря различному первичному составу гипербазитов, а также широко развившимся наложенным стадиям серпентинизации и других метаморфических процессов, серпентиниты характеризуются многообразием структурных особенностей и состава серпентинитовых и других минералов. Установлено также, что руды Баженовского месторождения неоднородны по первичному составу исходных пород и минеральному составу серпентинитов, что отразилось также на физико-химических и механических свойствах хризотил-асбеста.

Комплексное исследование хризотил-асбеста из разных типов руд показало, что физико-химические и механические свойства зависят от состава первичных пород, степени и типа их серпентинизации, а также от характера и интенсивности воздействия пострудных процессов. Наиболее ярко эти различия проявляются в значениях показателя прочности волокна на разрыв [Зырянов, 1979].

Известно, что различный состав вмещающих пород и постоянно меняющиеся физико-химические условия среды при образовании хризотил-асбеста и последующие изменения в связи с развитием тех или иных геологических процессов привели к частичному изменению кристаллической структуры [Бахтин, 1981] как хризотил-асбеста, так и других минералов. Имея общую кристаллохимическую формулу $Mg_3[Si_2O_5][OH]_4$, хризотил-асбесты отличаются степенью железистости, степенью окисления железа, содержанием воды. Это, в конечном счете, приводит к различию физико-химических и механических, в том числе прочностных, свойств хризотил-асбеста, обладающего исключительным многообразием природных разновидностей: широким диапазоном прочностных свойств, упругости волокон и других физико-механических качеств.

При промышленном использовании хризотил-асбеста наиболее важными являются прочностные характеристики волокна. Связь кристаллохимических особенностей хризотила с прочностными характеристиками его волокон изучена недостаточно.

Поэтому ни один из многочисленных способов определения прочности волокна хризотил-асбеста [Методика..., 1999], основанных либо на использовании различных физико-химических методов анализа вещества (рентгеновского, химического, термического, электронно-микроскопического, инфракрасной спектроскопии поглощения), либо на реакции при воздействии на волокно хризотил-асбеста различными препаратами (определение количества растворимых примесей в концентрированной соляной кислоте, величины электрокинетического потенциала в методе электроосмоса с поправкой на поверхностную проводимость, способности волокна к распушке, окрашивания волокна раствором хлор-цинк-йода и др.), либо упрощенным методом путем разрыва вручную, не дает однозначного результата. Только комплекс перечисленных методов может, и то только качественно, оценить прочность хризотил-асбеста исключительно технологическими, не претендующими на строгость и объективность, терминами: „ломкий“, „полумомкий“, „нормальной“ прочности. Известен также прямой способ определения прочности волокна хризотил-асбеста. Способ основан на приложении к образцу механических усилий на специальных аппаратах. По величине нагрузки, при которой происходит разрыв волокон, оценивают их прочность. Способ сопряжен со значительными трудностями, дает большой разброс значений и из-за технологических особенностей может быть реализован только при исследовании длинного волокна (вероятно, примерно от 10 мм).

Нашими предыдущими исследованиями [Бахтерев, 2000а] установлено поведение при высоких температурах электрического сопротивления некоторых серпентинитов (дунитовых и гарцбургитовых) из Баженовского месторождения хризотил-асбеста. Результаты сопоставлены с данными термического, минералогического, химического и других анализов. Выявлена связь характера поведения электрического сопротивления изученных серпентинитов с их генезисом и составом исходных пород. Установлено, что характер кривой электрического сопротивления с температурой $\lg R = f(T)$ определяется составом серпентиновых (и не только) минералов, набор которых определяется первичным составом гипербазитов и физико-химическими условиями процессов серпентинизации. Для хризотил-асбеста была выявлена связь между прочностью волокна и энергией активации минерала [Бахтерев, 2004а]. Установлено, что в температурной области 400—600 °С значение энергии активации линейно уменьшается от 2.5 эВ для хризотил-асбеста нормальной прочности (прочность на разрыв $Q = 3500$ МПа) до примерно 0.2 эВ для ломкого ($Q = 1200$ МПа). На способ определения прочности волокна хризотил-асбеста получен патент РФ [Патент..., 2004]. Способ, однако, может быть реализован только при исследовании длинного волокна.

При разработке месторождения всегда предпочтительна селективная выборка руды. В случае добычи асбеста важно еще на начальной стадии технологического процесса разделить потоки руды, содержащей ломкий хризотил-асбест и нормальной прочности. Точные и достоверные данные о вещественном составе руд и их пространственном размещении для селективной отработки позволяют повысить производительность и улучшить качество товарной продукции. Основная выработка асбеста происходит за счет коротковолокнистого асбеста. Так, по данным Г.М. Смирновой [1965], выход волокна длиной менее 1 мм составляет более 80 %. Со временем ситуация только усугубляется, так как в отработку вовлекаются руды с более глубоких горизонтов, меньшим содержанием асбеста и более коротковолокнистого. Поэтому выявление возможной связи между электрическими параметрами вмещающих серпентинитов и прочностными свойствами хризотил-асбеста представляет как геологический интерес, так и возможность для поиска альтернативных способов оценки качества минерала. Цель исследования — показать (правда, это выполнено на ограниченном числе образцов) существование возможных связей между параметрами высокотемпературной электропроводности вмещающих пород и прочностью волокна хризотил-асбеста.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Методика, включающая в себя физические, физико-химические и минералого-петрографические методы, и установка для высокотемпературных исследований электропроводности образцов горных пород описана нами ранее [Бахтерев, 2000а,б, 2004а,б, 2005]. Электрическое сопротивление (R) измеряли

двухэлектродной установкой в режиме динамического нагрева через каждые 10 °С в интервале температур 20—800 °С. Скорость нагревания 4 град/мин. Температуру определяли в 10 мм от образца хромель-алюмелевой термопарой. Образцы вырезали в форме кубика с ребром 15 мм и помещали между плоскими электродами (один электрод медь, второй — нержавеющая сталь). В качестве измерительного прибора использован тераомметр Е6-13А, позволяющий определять электрическое сопротивление постоянного тока в диапазоне от 10 до 10¹⁴ Ом и относительной ошибкой от ±2.5 до 4 % в зависимости от диапазона.

В физике диэлектриков электрическое сопротивление описывают формулой [Сканави, 1949]

$$R = \frac{6kT}{n_0\delta^2q^2\nu} \exp\left(\frac{E_0}{kT}\right). \quad (1)$$

Здесь E_0 — энергия активации, которую необходимо затратить на освобождение иона (носителя заряда) от связей в кристаллической решетке; n_0 — общее число ионов в 1 см³, участвующих в переносе тока; q — заряд иона; δ — длина свободного пробега; ν — частота колебаний иона в полуустойчивом положении; k — постоянная Больцмана; T — температура в Кельвинах.

Большинство исследователей [Пархоменко, 1989; Мецик, Щербаченко, 1990; Гусейнов, 1999; Бахтерев, 2000а; Бахтерев, Булыкин, 2001, 2002; Самотейкин, Гладушко, 2002], проводивших измерения электрического сопротивления при температурах 20—800 °С, экспериментально выявили зависимость, которую можно выразить в виде

$$\lg R = A + \frac{B}{T}. \quad (2)$$

Сопоставляя формулы (1) и (2), находим, что

$$A = \lg \frac{6kT}{n_0\delta^2q^2\nu}, \quad B = \frac{0.43E_0}{k}. \quad (3)$$

Для определения электрических параметров кривые высокотемпературной электропроводности были построены в координатах $\lg R, 1/T$. Энергия активации E_0 определена по величине тангенса угла наклона касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ в некоторой точке прямолинейного участка в температурной области, где кривая $\lg R = f(1/T)$ не искажена аномальными эффектами. Коэффициент электрического сопротивления A в формуле (2), численно равный электрическому сопротивлению R_0 при $(1/T) = 0$, определен как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой $\lg R = f(1/T)$ на оси ординат. Так были определены параметры высокотемпературной электропроводности E_0 и R_0 в области собственной проводимости для всех исследованных образцов.

Образцы для исследований отобраны из керна четырех скважин, пройденных в зоне западной асбестовой полосы месторождения. Всего отобрано 24 образца по 6 из каждой скважины. Из части образцов изготовлены прозрачные шлифы и изучены под микроскопом. Для всех образцов выполнен дериватографический анализ. Магнитная восприимчивость определена капнометром КТ-5с по шести граням образца-кубика. Все отобранные образцы асбестоносны. Качество (прочность на разрыв) хризотил-асбеста оценено упрощенным методом [Методика..., 1999].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные нами образцы представлены четырьмя группами серпентинитов (по 6 образцов в каждой группе): апогарцбургитовыми антигоритовыми (группа А), аподунитовыми хризотил-антигоритовыми (группа Б), аподунитовыми офит-антигорит-хризотилитовыми (группа В), апогарцбургитовыми и апопироксенитовыми хризотил-антигоритовыми (группа Г). Образцы в разных группах отличаются минеральным составом, различны по физическим и физико-химическим параметрам, а также по качеству (прочностью на разрыв) связанного с ними хризотил-асбеста. Некоторые физико-химические параметры по группам образцов показаны в табл. 1. По данным шлифового анализа представлен минеральный состав части исследованных образцов (табл. 2). На рис. 1 приведены результаты дериватографии — типичные кривые по каждой группе образцов (ДТА — дифференциального термический, ТГ — термогравиметрический анализы, T — кривая температуры). Для всех образцов внутри каждой группы получены аналогичные результаты. Из анализа материалов, приведенных на рисунке и в таблицах, вытекает следующее.

По данным дериватографии (по характеру поведения кривых ДТА и ТГ) все исследованные образцы серпентинитов уверенно разделяются на четыре группы. На кривых ДТА выделяются четкие пики, связанные с эндотермическими эффектами, обусловленными дегидратацией пироаурита (200 °С), брусита-немалита (418—450 °С) и серпентина (665—745 °С). Дегидратация серпентина начинается уже при 600 °С, хотя четким пиком эндотермический эффект обозначается при разных температурах в зависимости

Таблица 1.

Некоторые физико-химические параметры исследованных образцов

Группа образцов	Плотность σ , г/см ³		Магнитная восприимчивость χ , усл. ед.		ΔT , °C		ΔP , %	Качество хризотил-асбеста
	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_{\text{min}} - \sigma_{\text{max}}$	$\chi_{\text{ср}}$	$\chi_{\text{min}} - \chi_{\text{max}}$	$\Delta T_{\text{ср}}$	$\Delta T_{\text{min}} - \Delta T_{\text{max}}$		
А	2.61	2.46—2.81	5.79	0.69—9.41	78	60—85	8	Ломкий
Б	2.52	2.49—2.54	8.08	6.90—8.62	127	119—138	17	Нормальный
В	2.55	2.54—2.56	10.09	8.68—11.92	136	135—138	14	»
Г	2.59	2.54—2.63	5.57	1.32—11.14	86	65—114	15	Ломкий

Примечание. ΔT , °C — разность температур между эндо- и экзоэффектом ДТА; ΔP , % — среднее значение (по группе образцов) потеря веса при прокаливании по данным ТГ.

Таблица 2.

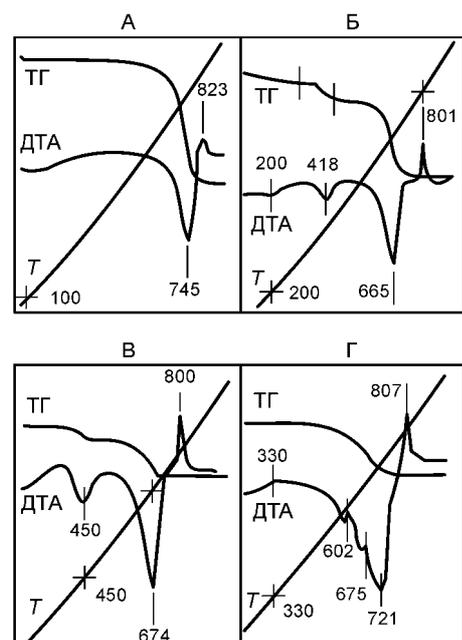
Минеральный состав части исследованных образцов

Минерал	Содержание основных породообразующих минералов (%) в образцах																
	А				Б				В					Г			
	16	17	18	19	21	23	27	28	30	31	33	34	39	40	41	42	45
Хризотил	—	60	40	45	10	15	71	40	65	50	40	35	45	32	35	40	30
Антигорит	75	—	—	20	60	55	10	38	5	5	5	20	30	50	45	40	50
Офит	—	—	—	—	—	5	—	—	15	20	20	10	10	—	—	—	—
Брусит*	—	—	—	—	13	10	14	12	8	10	—	10	2	5	4	7	—
Карбонат	—	—	—	—	5	5	—	7	5	10	10	15	10	10	8	3	15
Оливин	—	20	35	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Пироксен	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Амфибол	—	—	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Хлорит	15	—	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Рудный	10	10	3	10	12	10	5	3	2	5	10	10	3	3	8	10	5
Лимонит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15	—	—	—	—	—	—

Примечание. А, Б, В, Г — группы образцов; 16—45 — номера образцов.

* Дано суммарное содержание брусита и его волокнистой разновидности — немалита.

от разновидности серпентинового минерала [Варлаков, Матвеев, 1974]. При термогравиметрическом определении потеря веса серпентинита в интервале температур 20—900 °C также четко наблюдаются эффекты, отражающие разложение брусита и дегидратацию серпентина. Слабый экзотермический пик при 330 °C связан с окислением магнетита [Варлаков, Матвеев, 1974], экзотермический эффект при 800—820 °C — с кристаллизацией форстерита после разложения



решетки серпентиновых минералов. Амплитуда пика зависит от характера серпентиновых минералов. Особенностью кривых ДТА хризотил-асбеста является различный температурный интервал между эндотермическим и экзотермическим пиками в зависимости от прочности асбеста. При этом экзотермический эффект ДТА ломкого хризотил-асбеста следует непосредственно из высокотемпературного плеча эндотермического эффекта [Методика..., 1999]. Подобное поведение кривых ДТА наблюдаем и в исследованных серпентинитах (см. рис. 1, табл. 1).

Далее приведено краткое минералого-петрографическое описание исследованных образцов по группам серпентинитов.

Группа А. Апогарцбургитовые антигоритовые серпентиниты (обр. 15—20) с содержанием (%): антигорита — до 75, хлорита — 10—15, хромшпинели — 8—10. Основная ткань

Рис. 1. Типичные кривые термического анализа образцов групп А, Б, В, Г исследованных серпентинитов.

ДТА — дифференциально-термический, ТГ — термогравиметрический анализы, Т — температура. Числа на кривых — температура термических эффектов.

горной породы сложена микрочешуйчатым антигоритом. Структура породы лепидобластовая, петельчатая. На этом фоне выделяются рыжеватые пятна, сложенные микрочешуйчатым хлоритом, и относительно крупные чешуйки оптически однообразно ориентированного антигорита, которые воспроизводят контур замещенного ими пироксена (энстатита). Характерно практически полное отсутствие петельчатого магнетита. Макроскопически серпентинит карбонатизированный, светло-зеленый с зернами, жилками магнетита, по трещинам корочки серпофита, с жилками серпофит-карбонатного состава. Асбестоносность представлена жилками и просечками асбеста поперечно- и продольно-волокнистого строения. Волокно светло-зеленое ломкое.

Группа Б. Аподунитовые хризотил-антигоритовые серпентиниты (обр. 21, 23, 25—28) с содержанием (%): антигорита — 65—10, хризотила — 10—71, брусита — 10—14, рудного минерала — 3—12; присутствуют карбонат, офит. Макроскопически порода характеризуется явно выраженной тонкозернистостью, обусловленной структурой антигорита, содержащего мельчайшие вкрапления брусита и аморфного офита. В ее составе преобладают пластинки антигорита при подчиненном содержании хризотила, местами превращенного в асбест. Текстурированный рисунок образцов этой группы обусловлен наличием большого количества жилок магнетита, разделяющих породу на многочисленные угловатые обломки. Структура пород преимущественно перекрещенно-волокнистая, волокнисто-пластинчатая. По данным дериватографии отмечено присутствие пирроаурита ($Mg_6Fe_2[OH]_{10}[CO_3]4H_2O$). В массиве серпентинит темно-зеленый, с вкрапленностью магнетита, с жилками серпофит-немалитового состава. Асбестоносность представлена просечками продольного строения. Волокно светло-серое, нормальной прочности.

Группа В. Серпентиниты аподунитовые, офит-антигорит-хризотилитовые (обр. 29, 30, 31, 33, 34 и 39), характеризующиеся преобладанием хризотила (35—65 %), сопровождаемого прожилками асбеста, с подчиненным содержанием антигорита (5—30 %). В их составе присутствуют также значительные содержания (%): офита (10—20), брусита (2—10) и рудного (2—10), а обр. 30, 33, 34, 39 отличает интенсивная карбонатизация и лимонитизация. Порода интенсивно карбонатизирована и лимонитизирована. Для образцов характерны неоднородные текстуры и структуры пород. Отмечены массивная, прожилково-вкрапленная, прожилковая, перистая, ячеистая текстуры. Такое разнообразие текстур обусловлено наличием многочисленных прожилков разной направленности, рассекающих породу на отдельные весьма неправильные обломки. Разнозернистость слагающих их минералов определила многообразие структурных особенностей пород. Здесь выделены структуры: петельчатая, тонкочешуйчатая, решетчатая, неравномерно-зернистая, порфириобластовая, но преимущество имеет афанитовая структура без различимых простым глазом породообразующих компонентов. Хризотил-асбест нормальной прочности.

Группа Г. Серпентиниты апогарцбургитовые и апопироксенитовые хризотил-антигоритовые (обр. 40—45) примерно с одинаковыми содержаниями обоих минералов (с весьма незначительным (10—15 %) преобладанием антигорита над хризотилом). Из второстепенных минералов наиболее развиты

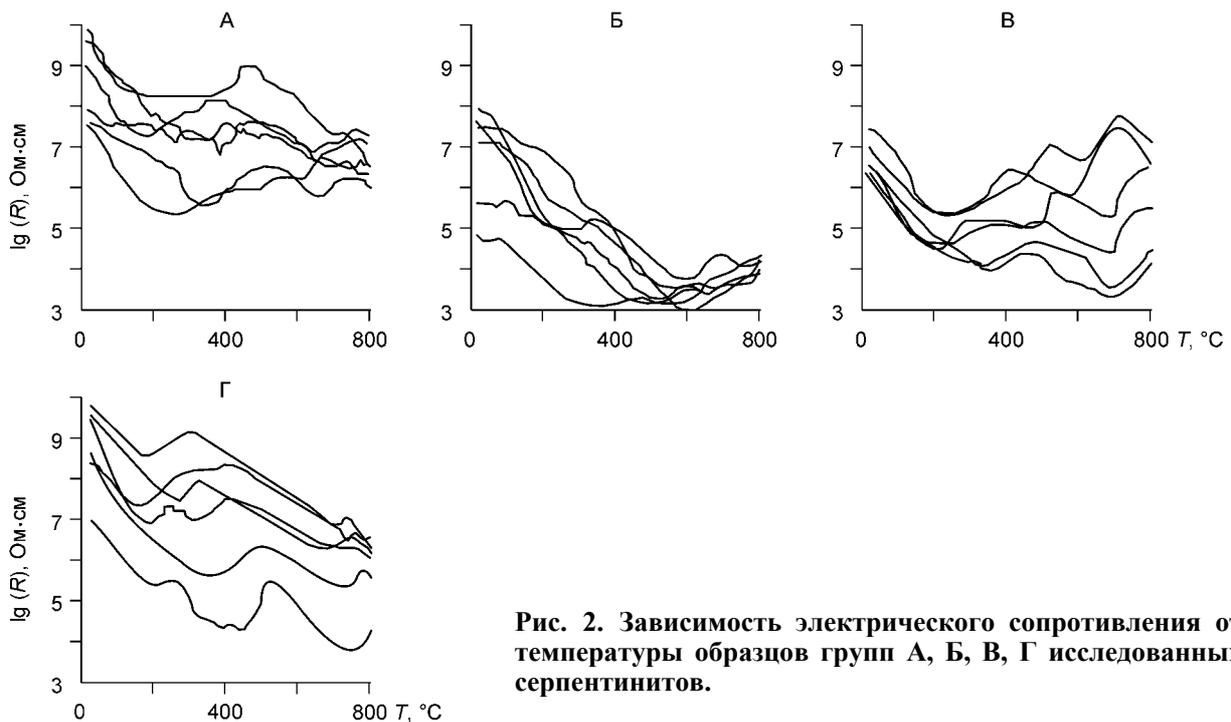


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления от температуры образцов групп А, Б, В, Г исследованных серпентинитов.

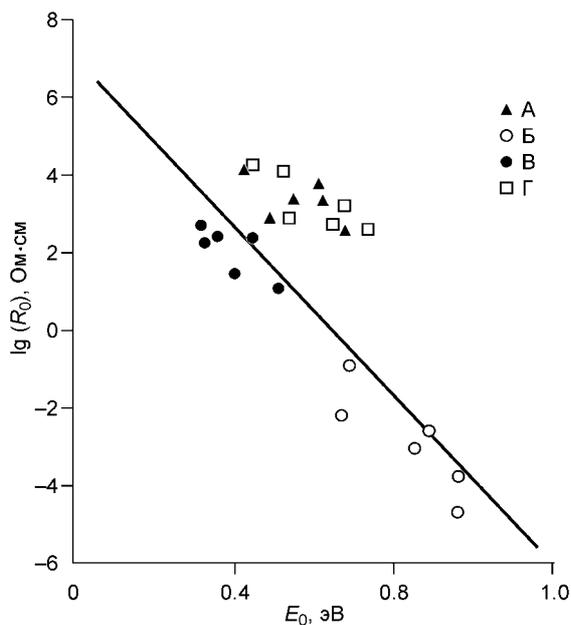


Рис. 3. Связь между E_0 и $\lg R_0$ образцов групп А, Б, В, Г исследованных серпентинитов.

Линия — прямая корреляции $\lg R_0 = f(E_0)$ для серпентинитов из безрудных площадей и гипербазитовых массивов дунит-гарцбургитовой формации, полученная ранее [Бахтерев, 2004б].

карбонаты и рудные, в меньших количествах распространен брусит. Из текстурных особенностей следует отметить массивность пород с небольшим присутствием вкраплений и малым количеством жильных образований. Одним из самых значительных отличий данной группы пород являются порфиробластические, идиоморфно-бластические структуры и наличие бастита — псевдоморфоз серпентинитовых минералов по пироксену. Асбестоносность представлена жилками и просечками поперечно- и продольно-волоконистого строения. Волокно светло-зеленое, белое, ломкое.

На рис. 2 приведены кривые $\lg R = f(T)$ исследованных серпентинитов. Особенностью исследованных пород является широкий диапазон электрического сопротивления при нормальной температуре (более 5 порядков). Начальный участок (20—200 °С) кривой $\lg R = f(T)$ почти всех исследованных образцов серпентинитов характеризуется уменьшением электрического сопротивления.

Разный наклон кривой $\lg R = f(T)$ здесь определяется различным влагосодержанием серпентинитов, при его среднем значении, по данным [Вагшаль, 1965], около 0.65 %. При температурах выше 200 °С, после удаления гигроскопической воды, вплоть до 800 °С электрическое сопротивление определяется сухим серпентинитом: минеральным составом, структурными и текстурными особенностями исследуемого образца [Бахтерев, 2000а]. Четко обнаруживается различный характер поведения кривых $\lg R = f(T)$ различных серпентинитов. Характер зависимости $\lg R = f(T)$ имеет особенности для каждой группы образцов. По величине электрического сопротивления, характеру кривых $\lg R = f(T)$, диапазону вариаций сопротивлений при различных температурах все исследованные образцы серпентинитов также можно разделить на 4 группы. Такое разделение имеет петрографическую основу и согласуется с петрографическими и физико-химическими характеристиками исследованных образцов серпентинитов (см. рис. 1, табл. 1 и 2).

На рис. 3 приведена связь между $\lg R_0$ и E_0 исследованных образцов серпентинитов. Графическое изображение этой связи в координатах $\lg R_0, E_0$ четко показывает три поля распределения фигуративных точек: одно соответствует серпентинитам аподунитовым хризотил-антигоритовым (группа Б), второе — аподунитовым офит-антигорит-хризотилитовым (группа В), третье — апогарцбургитовым антигоритовым (группа А) и апогарцбургитовым и апопироксенитовым хризотил-антигоритовым (группа Г). Поля групп Б и В не совпадают и не пересекаются друг с другом и с полями групп А и Г. Поля групп А и Г полностью совпадают. Кроме того, точки полей Б и В находятся по одну сторону корреляционной прямой $\lg R_0 = f(E_0)$, установленной ранее [Бахтерев, 2004б] для серпентинитов из безрудных площадей и гипербазитовых массивов дунит-гарцбургитовой формации, а полей А и Г — по другую. С серпентинитами групп образцов Б и В связан хризотил-асбест нормальной прочности, с серпентинитами групп образцов А и Г — ломкий. Кроме того, группы образцов серпентинитов с хризотил-асбестом нормальной прочности отличаются содержанием брусита и его волокнистой разновидности — немалита, главного мешающего минерала, ухудшающего качество готового товарного асбеста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы образцы серпентинитов апогарцбургитовых антигоритовых (группа А), аподунитовых хризотил-антигоритовых (группа Б), аподунитовых офит-антигорит-хризотилитовых (группа В), апогарцбургитовых и апопироксенитовых хризотил-антигоритовых (группа Г). Образцы в разных группах отличаются минеральным составом, различны по физическим и физико-химическим параметрам, отличаются качеством (прочностью на разрыв) связанного с ними хризотил-асбеста.

2. Получены зависимости электрического сопротивления серпентинитов от температуры в интервале 20—800 °С. Выявлен широкий диапазон изменений электрического сопротивления для каждой группы образцов, своеобразный характер кривых $\lg R = f(T)$, а также широкий диапазон изменений параметров

высокотемпературной электропроводности (энергии активации E_0 и так называемого коэффициента электрического сопротивления $\lg R_0$).

3. Выявлена связь между прочностью волокна хризотил-асбеста и параметрами высокотемпературной электропроводности вмещающих его серпентинитов. Поля распределения фигуративных точек исследованных образцов серпентинитов в координатах E_0 , $\lg R_0$, вмещающих ломкий хризотил-асбест и нормальной прочности, не совпадают и не пересекаются друг с другом. Поля распределения фигуративных точек групп образцов серпентинитов с хризотил-асбестом нормальной прочности, отличающихся содержанием брусита и его волокнистой разновидности — немалита, также не совпадают между собой. Поля распределения фигуративных точек групп образцов серпентинитов с ломким хризотил-асбестом полностью совпадают. Кроме того, поля распределения фигуративных точек групп образцов серпентинитов с хризотил-асбестом нормальной прочности находятся по одну сторону корреляционной прямой, $\lg R_0 = f(E_0)$, установленной для серпентинитов из безрудных площадей и гипербазитовых массивов дунит-гарцбургитовой формации, а поля с хризотил-асбестом ломким — по другую.

4. Описанные результаты позволяют надеяться на то, что можно будет расчленять руды с различным качеством хризотил-асбеста по параметрам высокотемпературной электропроводности вмещающих их серпентинитов.

ЛИТЕРАТУРА

Баженовское месторождение хризотил-асбеста / Под ред. К.К. Золоева, Б.А. Попова. М., Недра, 1985, 271 с.

Бахтерев В.В. О характере изменения при высоких температурах электрического сопротивления серпентинитов из Баженовского месторождения (Урал) // Геология и геофизика, 2000а, т. 41 (9), с. 1325—1330.

Бахтерев В.В. Методика измерения электрического сопротивления гипербазитов при высоких температурах // Уральский геофизический вестник № 1. Екатеринбург, УрО РАН, 2000б, с. 18—20.

Бахтерев В.В. Изучение высокотемпературной электропроводности природных хризотил-асбестов с целью оценки их прочностных свойств // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении, Вып. 6. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Пермь, Изд-во Перм. ун-та, 2004а, с. 27—30.

Бахтерев В.В. Оценка формационной принадлежности гипербазитов Урала по параметрам их высокотемпературной электропроводности // Докл. РАН, 2004б, т. 398, № 3, с. 371—373.

Бахтерев В.В. Особенности высокотемпературной электропроводности хромитовых руд и вмещающих их гипербазитов // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (8), с. 796—805.

Бахтерев В.В., Булыкин Л.Д. Параметры электропроводности при высоких температурах дунитов в зависимости от степени их серпентинизации // Докл. РАН, 2001, т. 379, № 6, с. 793—796.

Бахтерев В.В., Булыкин Л.Д. Вариации электрического сопротивления дунитов в зависимости от температуры и степени серпентинизации (на примере Урала) // Геология и геофизика, 2002, т. 43 (10), с. 960—967.

Бахтин А.И. Кристаллохимия серпентинитов по данным оптической спектроскопии // Геохимия, 1981, № 4, с. 613—616.

Вагшаль Д.С. Об электропроводности гипербазитов // Теория и практика электромагнитных методов исследования вещества и структур Земли. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1965, с. 119—124.

Варлаков А.С. Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1986, 224 с.

Варлаков А.С., Матвеев С.И. Термоаналитическое изучение серпентинитов Хабарнинского гипербазитового массива // Геология и полезные ископаемые Урала. Свердловск, 1974, с. 5—19. (Тр. СГИ, вып. 79).

Гусейнов А.А. Исследование электропроводности биотитов при высоких температурах // Физика Земли, 1999, № 11, с. 75—82.

Зырянов В.А. Стадийность, направленность и баланс вещества при процессах серпентинизации и асбестообразования на Баженовском месторождении // Добыча и обогащение асбестовых руд. Асбест, 1979, с. 29—39 (Тр. ВНИИпроектасбест, вып. 21).

Зырянов В.А., Воронов И.Е., Гурьев С.А. Физико-химические и механические свойства хризотил-асбеста из различных типов руд // Разведка и охрана недр, 1985, № 1, с. 41—46.

Методика определения содержания хризотил-асбеста. Асбест, АОТ НИИпроектасбест, 1999, 104 с.

Мецик М.С., Щербаченко Л.А. Электрические свойства слюд. Иркутск, Изд-во Иркут. ун-та, 1990, 328 с.

Пархоменко Э.И. Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. М., Недра, 1989, 198 с.

Патент 2241218 (Россия). Способ определения прочности волокна хризотил-асбеста / Бахтерев В.В. Оpubл. 27.11.2004. Бюл. № 33.

Самотейкин В.В., Гладушко О.А. Особенности электропроводности щелочно-силикатных стекол // Стекло и керамика, 2002, № 1, с. 7—9.

Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). М.; Л., Гостехтеориздат, 1949, 500 с.

Степанова Г.М. Технологическая схема асбестообогатительной фабрики № 6 треста „Союзасбест“ // Добыча и обогащение асбестовых руд. М., Недра, 1965, с. 3—16. (Тр. ВНИИпроектасбест, Вып. 5).

Штейнберг Д.С., Чашухин И.С. Серпентинизация ультрабазитов. М., Наука, 1977, 312 с.

*Рекомендована к печати 30 июня 2006 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
25 января 2006 г.*