

## О ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ СЕРПЕНТИНИТОВ, ВМЕЩАЮЩИХ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТ, С ПРОЧНОСТЬЮ ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТА

*(на примере Баженовского месторождения хризотил-асбеста)*

**Бахтерев В.В.** – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

**Аннотация.** 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. Известно, что электрические свойства горных пород зависят от частоты электромагнитного поля. Эти зависимости различны для разных горных пород. На разных участках частотного диапазона эта зависимость обусловлена различными физическими явлениями и процессами. Получены частотные зависимости активного электрического сопротивления и диэлектрических потерь серпентинитов в интервале (0,01–100) кГц. Для исследованного частотного диапазона выявлена связь между параметрами ( $\lg R$  и  $\lg tg\delta$ ). Она имеет вид  $\lg R = a + b \lg tg\delta - c(\lg tg\delta)^2$  (для серпентинитов с ломким хризотил-асбестом) и  $\lg R = a - b \lg tg\delta - c(\lg tg\delta)^2$  (для серпентинитов с хризотил-асбестом нормальной прочности). Для образцов серпентинитов, содержащих хризотил-асбест одного качества, корреляционные уравнения  $\lg R = f(\lg tg\delta)$  аналогичны, различаются только коэффициентами. Полученные результаты сопоставлены с параметрами высокотемпературной электропроводности (энергия активации и так называемый коэффициент электрического сопротивления) (Бахтерев, 2007). Комплекс электрических параметров (температурных и частотных зависимостей электрического сопротивления и диэлектрических потерь) серпентинитов, вмещающих хризотил-асбест, позволяет однозначно оценить качество хризотил-асбеста технологическими терминами: «ломкий», «нормальной прочности».

*Серпентинит, серпентиновые минералы, омическое и активное сопротивление, диэлектрические потери, частотная дисперсия, прочность хризотил-асбеста.*

FREQUENCY DISPERSION OF ELECTRICAL PARAMETERS  
(RESISTANCE, DIELECTRIC LOSSES) ULTRABASIC ROCKS;  
MECHANICAL PROPERTIES OF CHRYSOTILE-ASBESTOS: POSSIBLE LINKAGE  
(by the example of the Bazhenov deposit of chrysotile-asbestos)

**Bakhterev V.V.** – Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg

**Abstract.** 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. It is known that the electrical properties of rocks depend on the frequency of the electromagnetic field. In different parts of the frequency range, this dependence is due to different physical phenomena and processes. Obtained frequency dependence of active electrical resistance and dielectric loss of serpentinites in the interval (0.01–100) kHz. For the investigated frequency range correlation between the parameters ( $\lg R$  and  $\lg tg\delta$ ). It has the appearance of  $\lg R = a + b \lg tg\delta - c(\lg tg\delta)^2$  (the brittle serpentinite with chrysotile-asbestos) and  $\lg R = a - b \lg tg\delta - c(\lg tg\delta)^2$  (serpentinite with chrysotile-asbestos normal strength). For samples of serpentinite containing chrysotile-asbestos of the same quality, correlation equations  $\lg R = f(\lg tg\delta)$  are similar, and differ only by coefficients. The obtained results are compared with the parameters of high-temperature conductivity (the activation energy and the so-called coefficient of electrical resistance) (Бахтерев, 2007) The complex electrical parameters (temperature and frequency dependencies of electrical resistance and dielectric loss) of serpentinite containing chrysotile-asbestos, allows you to clearly assess the quality of chrysotile-asbestos in technological terms: "brittle", "normal strength".

*Serpentinite, serpentine minerals, ohmic and active electrical resistance, dielectric losses, frequency dispersion, strength of chrysotile-asbestos.*

### **Введение**

Большинство минералов, горных пород, руд по механизму электропроводности ближе всего примыкают к диэлектрикам. Из всего многообразия физических свойств важнейшими, характеризующими вещество как диэлектрик, являются электрические свойства: поляризация, электропроводность, диэлектрическая проницаемость. В горных породах поляризация является результирующей нескольких различных процессов. Возникновение того или иного вида поляризации определяется физико-химическими свойствами среды, вещественным составом, структурными и текстурными особенностями. Ввиду неодинакового времени установления различных видов поляризации, диэлектрическая проницаемость реального вещества с частотой существенно может меняться. В горных породах, представляющих многофазные системы, возможно одновременное проявление большинства видов поляризации, что значительно осложняет зависимости диэлектрической проницаемости, сопротивления, диэлектрических потерь от частоты электрического поля. Частотная зависимость потерь является характеристикой материала и определяется для каждого материала не только свойствами молекул, но и наличием и составом примесей, дисперсностью среды. Частотное поведение потерь отражает структуру вещества. В случае переменных полей в диэлектрике появляется связь между электропроводностью, диэлектрической проницаемостью и диэлектрическими потерями, которые зависят от частоты электрического поля (Одинаев, Махмадбегов, 2013). Характер такой связи зависит от состава и структуры вещества (Бахтерев, 2016).

### **Некоторые примеры исследований частотной дисперсии электрических свойств горных пород**

Проблема частотной дисперсии комплексной электропроводности диэлектрически неоднородных сред активно обсуждается в научной литературе (Светов, 1992; Бердичевский и др., 1995; Судакова, Владов, 2011; Аксельрод, 2012 и др.). Многи-

ми экспериментальными работами однозначно доказана зависимость электрических свойств горных пород от частоты электромагнитного поля. Эти зависимости исследованы для разных горных пород и различного частотного диапазона. На разных участках частотного диапазона эта зависимость обусловлена различными физическими явлениями и процессами.

М.П. Воларович с соавторами (Воларович и др., 1965) изучали зависимость активного электрического сопротивления осадочных горных пород (известняк, песчаник, алевролит, доломит) различной влажности от частоты в диапазоне 0–21000 Гц. Для исследованных осадочных пород частотная дисперсия активного сопротивления наблюдается только при незначительной влажности, которая не является типичной для данного комплекса пород в естественном залегании. Так для образца песчанистого мергеля при влажности 0,96 % в интервале от 1 до 21 кГц сопротивление уменьшается примерно на 1,5 порядка, а при влажности 7,65 % – практически не зависит от частоты.

И.И. Кононенко (Кононенко, 1972) впервые (в 1966 г.) выполнил исследования частотной зависимости электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости горных пород с вкрапленностью электропроводящих минералов в диапазоне частот  $(0,1-1,85) \cdot 10^6$  Гц. Образцы – породы, вмещающие медноколчеданные месторождения Урала. Породы магматические (эффузивные и интрузивные) и метаморфические различной текстуры и в различной степени минерализованные сульфидами. Установлена отчетливо выраженная частотная зависимость – с частотой уменьшается сопротивление и диэлектрическая проницаемость; с увеличением содержания сульфидов резко уменьшается сопротивление и возрастает диэлектрическая проницаемость. Исследования проведены на воздушносухих образцах при комнатной температуре. Исследованием свойств образцов пород во влажном состоянии (образцы выдерживали в воде в течение 3–5 суток) установлено, что у мас-

сивных, плотных пород (альбитофиры, порфириды, мигматиты, серпентиниты) без вкрапленности и с редкой вкрапленностью сульфидных минералов электрические свойства практически не изменяются по сравнению с воздушносухими образцами.

Измерения выполнены с использованием прибора ИЭМС-1, который «представляет собой высокочастотный автокомпенсатор, измеряющий активную и реактивную составляющую сигнала. Разделение на составляющие измеряемого напряжения производится путем синхронного детектирования, регистрация компонентов осуществляется по отдельным каналам. В качестве источника переменного гармонического напряжения используется автогенератор с триггерным делителем частоты. Диапазон рабочих частот ИЭМС-1 составляет 15–2500 кГц» (Зеливянская, 2010, с. 73).

Авторы работы (Астраханцев, Улитин, 1968) выполнили измерения электрических свойств горных пород, вмещающих медноколчеданные месторождения Урала, различного состава на звуковых частотах (0– $10^4$ ) Гц. При этом установили, что проводимость зависит от частоты. Ток смещения изменяется с частотой. Током смещения нельзя пренебрегать во всем диапазоне звуковых частот: на переменном токе удельное сопротивление пород, содержащих вкрапленные электропроводящие минералы, является комплексным и зависит от частоты.

Авторы работы (Талалов, Даев, 2000) добавляли в породу порошок пирита; после чего на частотной зависимости диэлектрических потерь в области частот  $10^3$ – $10^9$  Гц обнаружили экстремумы, которых не было до того, как им добавили пирит (увеличилась диэлектрическая проницаемость, и понизилось сопротивление).

И.О. Гаргацев и А.А. Гусейнов (Гаргацев, Гусейнов, 2001) исследовали частотную дисперсию электрических параметров образцов гранит-порфиров и диабазов (Дагестан) на трех частотах:  $5 \cdot 10^4$ ,  $5 \cdot 10^5$ ,  $5 \cdot 10^6$  Гц. Для всех исследованных образцов с ростом частоты электрического поля диэлектрические потери и проницаемость

уменьшаются.

В.П. Авраменко с соавторами (Авраменко В.П. и др., 1980) изучали частотные ( $2 \cdot 10^2$ – $5 \cdot 10^7$  Гц) зависимости проводимости монокристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . В результате исследований установили, что мнимая и действительная части проводимости монотонно возрастают с частотой и представлены в виде степенной функции  $\omega^S$ . Для мнимой части  $S = 1$ , для действительной – изменяется в пределах 0,6–2,0. В составе исследованных кристаллов были обнаружены различные примеси (это не абсолютно чистые монокристаллы).

#### **Результаты предыдущих высокотемпературных исследований серпентинитов, вмещающих хризотил-асбест**

Предыдущими исследованиями (Бахтерев, 2007) изучены образцы серпентинитов из Баженовского месторождения хризотил-асбеста.

«Образцы для исследований отобраны из керна четырех скважин, пройденных в зоне западной асбестовой полосы месторождения. Всего было 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» (Бахтерев, 2007, с. 117). Качество (прочность на разрыв) хризотил-асбеста оценено упрощенным методом (Методика ... , 1999).

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, отличаются качеством (прочностью на разрыв) связанного с ними хризотил-асбеста.

Для всех образцов внутри каждой группы получены аналогичные результаты.

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  $\lg R_0$ ).

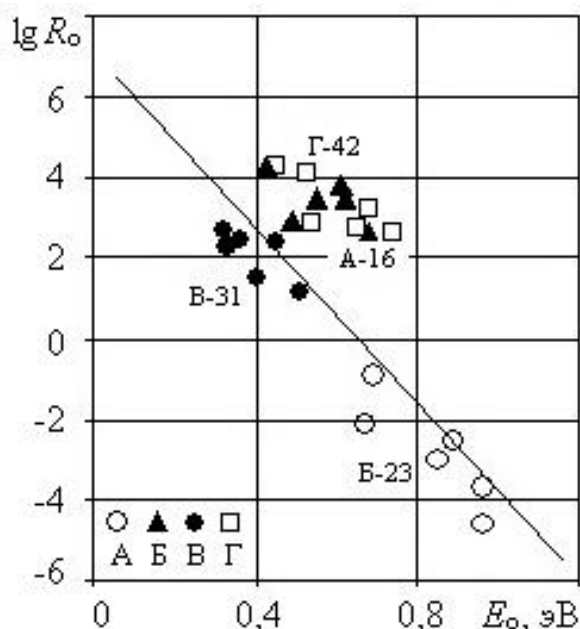
Выявлена связь между прочностью волокна хризотил-асбеста и параметрами высокотемпературной электропроводности вмещающих его серпентинитов. Поля распределения фигуративных точек исследованных образцов серпентинитов в координатах  $E_0$ ,  $\lg R_0$ , вмещающих хризотил-асбест «ломким» и «нормальной» прочности, 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 хризотил-асбестом «ломким» 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 (рис. 1).

Цель настоящей работы – исследовать частотную зависимость активного сопротивления и диэлектрических потерь в диапазоне частот (0,01–100) кГц, показать существование возможных связей между частотными характеристиками активного сопротивления и диэлектрических потерь образцов серпентинитов, вмещающих хризотил-асбест, и качеством хризотил-асбеста (прочностью на разрыв).

#### **Особенности серпентинизации гипербазитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста**

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 (Татаринов, 1967; Зырянов, 1977; 1979; Зырянов и др., 1985; Башта, 1980; Бахтин, 1981; Баженовское ... , 1985) 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.



**Рис. 1.** Связь между  $E_0$  и  $\lg R_0$  образцов групп А, Б, В, Г исследованных серпентинитов. Линия – прямая корреляции для серпентинитов из безрудных площадей и гипербазитовых массивов дунит-гарцбургитовой формации, полученная ранее (Бахтерев, 2004)

### **Серпентиновые минералы**

Характеристике серпентинов посвящена обширная литература (Артемов, Кузнецова, 1976; Штейнберг, Чашухин, 1977; Звягин, 1981; Варлаков, 1986; 1999; Штрюбель, Циммер, 1987; Жухлистов, 2011 и др.).

«К концу 80-х годов прошлого века было убедительно доказано, что серпентиновые минералы не являются полиморфными модификациями одного состава, а представляют собою самостоятельные минеральные виды... Совокупность химических, рентгеноструктурных, электронно-микрофракционных, термогравиметрических и спектроскопических данных свидетельствует, что все разнообразие морфологических разновидностей серпентинов можно свести к трем главным минеральным видам – лизардитам, хризотилам и антигоритам. По химическому составу эти виды различаются, прежде всего, количественными соотношениями оснований, кремнезема и конституционной воды» (Вотяков и др., 2002, с. 172–173). Уже имеется определенный опыт использования результатов кристаллохимических исследований этих минералов для решения петрогенетических вопросов. В частности, данные по кристаллохимии хризотила находят практические технологические применения. Для хризотил-асбеста соотношение ионов железа по неэквивалентным структурным позициям может быть использовано в качестве типоморфного признака, позволяющего однозначно идентифицировать прочностную разновидность минерала (Крутиков, Булатов, 1985; Булатов, Ивойлова, 1985; Булатов, 2012).

Серпентиновые минералы, имеющие общую формулу  $Mg_3[Si_2O_5]_2(OH)_4$ , отличаются по характеру кристаллического строения и особенностям состава. Катионы магния могут изоморфно замещаться катионами  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ , а кремний в тетраэдрах – катионами  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ . Структура лизардитов – плоские, хризотилов – цилиндрические или спирально-свернутые, антигоритов – волнообразно изогнутые слои. В серпентинах атомы имеют прочные связи в двумерных слоях и слабые –

между ними, что сказывается на особенностях взаимного расположения и последовательности форм наложения слоев. Это обуславливает появление политипных модификаций (Варлаков, 1986). Политипы – это структуры, построенные из одних и тех же слоев с разной последовательностью их чередования. Параметры решетки у политипов в плоскости слоя неизменны, а в направлении, перпендикулярном слоям, различны. Различие политипов проявляется в некоторых их свойствах.

Серпентин не образует монокристаллы. Формы выделений разнообразны: массивные (лизардит), волокнистые (хризотил), пластинчатые (антигорит), плотные скрытокристаллические массы (серпофит), колломорфные (девейлит – смесь разновидности волокнистого серпентина клинохризотила и лизардита), сплошные почти аморфные массы (керолит), волокнистые (хризотил), параллельно-волокнистые (хризотил-асбест), спутано-волокнистые (церматит) агрегаты и др. (Штрюбель, Циммер, 1987).

### **Особенности свойств мелкодисперсных частиц**

«Разновидности серпентина в породах по-разному образуют агрегаты из параллельно ориентированных индивидов. Хризотил образует волокна, плотно прилегающие друг к другу. В серпофите, состоящем из субмикроскопической длины волокон, последние совместно с аморфным веществом образуют срастание на электростатическом уровне, в связи с чем и агрегаты приобретают свойства, близкие к таковым для отдельных индивидов. В хризотиловых асбестах подобное взаимодействие, видимо, имеет место только в местах соприкосновения волокон, в связи с чем их можно отделять друг от друга. Поскольку для хризотила известны не только рулоны, но и лейсты, то они, возможно, помещаются в межрулонном пространстве. Для лизардита свойственно алоскочешуйчатое (или немного изогнутое) строение индивидов, в связи с чем параллельно ориентированные вокруг зерна оливина чешуйки взаимодействуют между собой. Так как для лизардита

та свойственна плоскочешуйчатая (или слабо изогнутая) форма частиц, то именно ими сложены оболочки псевдоморфоз, а также прожилки в оливине, реликты которого сохранились» (Зинчук, Мельник, 1996, с. 249).

Исследования состава и структуры ряда минералов показали, что большинство их свойств меняются при уменьшении размеров индивидов, особенно заметно с величины 0,1 мм (Конеев и др., 1994). На примере песчаника и известняка показано влияние микроструктуры горных пород на макроскопические теплофизические свойства, в частности, эффективную теплопроводность (Горбань и др., 2009). Это может позволить провести классификацию горных пород по литологической микроструктуре с различными типами насыщения и определить взаимосвязь между микроструктурой горной породы и ее теплофизическими свойствами.

Подобные «размерные модификации» рассматриваются как разновидность минерального вида – микроминералы. Они известны в физике «малые частицы», определяя их аномальные свойства (Петров, 1982). Выявлены уникальные физические свойства наноматериалов, в первую очередь магнитные и электрофизические: электропроводность, диэлектрическая проницаемость. На этом основано создание новых материалов с заданными свойствами. Так в зависимости от способа выращивания кристаллов, получают разную структуру. В результате меняется частотный спектр диэлектрических потерь в интервале частот  $10^{-3}$ – $10^3$  Гц (Нгуен и др., 2015).

В работе (Геладзе, Челидзе, 1974) описаны результаты измерений электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости кварцевого песка различной зернистости: 1 мк, 10 мк, 0,5–0,25 мм, 0,5–1 мм на двух частотах (2000 и 200000 Гц). Установлено, что с уменьшением размера зерна сопротивление увеличивается в 3 раза для обеих частот; диэлектрическая проницаемость уменьшается на 1,5 порядка на частоте 2000 Гц и на 5–7 % – на частоте 200000 Гц.

### **Методика исследований**

Методика определения электропроводности образцов горных пород и электрических параметров при высоких температурах описана ранее (Бахтерев, 2004). Образцы для исследований вырезали в форме кубика с ребром 0,02 м. Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли двухэлектродной установкой через каждые 10 градусов в интервале температур 20–800 °С. Скорость нагревания 0,066 град/с. Температуру в системе определяли платино-платинородиевой термопарой в 0,01 м от образца. Измерения электрического сопротивления осуществляли при постоянном напряжении. Прибор для измерения электрического сопротивления на постоянном токе – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до  $10^{14}$  Ом и пределами допустимой относительной погрешности измерений от  $\pm 2,5$  до 4 % в конце диапазона. В качестве измерительного прибора для определения электрических параметров на переменном токе использован «Измеритель L, C, R цифровой» Е7-8. Прибор позволяет измерять тангенс угла диэлектрических потерь и активное сопротивление. Рабочая частота прибора 1000 Гц. Частотную дисперсию активного сопротивления и тангенса диэлектрических потерь исследовали в интервале 0,01–100 кГц. Методика описана в работе (Бахтерев, 2016) и в руководстве по эксплуатации прибора (Измеритель ..., 2005).

Исследованы дубликаты образцов из четырех групп серпентинитов (А, Б, В, Г). В настоящей работе приведены результаты исследований по одному образцу серпентинитов из каждой группы (А-16, Б-23, В-31, Г-42). Результаты исследований остальных образцов – аналогичны. Исследования выполнены на воздушносухих образцах.

### **Описание исследованных образцов**

*Образец Б-23.* Хризотил-антигоритовый серпентинит, аподунитовый. Состав, %: антигори – 55, хризотил – 15, рудный – 10, брусит – 10, карбонат – 6, офит – 3. Текстура катакластическая, прожилковая,

вкрапленная. Структура перекрещенно-волоконистая, тонкозернистая.

Макроскопически – черная с занозистым изломом порода со светло-зелеными многочисленными сколами, выступающими как вкрапления. На плоскостях многочисленных трещин отдельности принимает светло-зеленый (змеевидоподобный) цвет.

В шлифе при 5-кратном увеличении наблюдаются многочисленные разноориентированные жилки рудного, создающие вид паутины. В проходящем свете микроскопа при 50-кратном увеличении порода состоит из крупных вытянутых пластинок антигорита, большей частью расположенных взаимопараллельно. Местами она принимает тонкозернистую структуру, которая обусловлена наличием мелких разноориентированных пластинок антигорита с неясными зубчатыми ограничениями и неоднородным как бы облачным угасанием.

Хризотил представлен крупными волокнами, большей частью расположенных взаимопараллельно. В отдельных участках наблюдается перекрещенное расположение волокон, придавая породе соответствующую структуру, а также наличие включений карбоната. Крупные (мощностью 0,3–0,5 мм) жилки магнетита всегда окаймляются полосками лимонитизированного (буроватого) хризотил-асбеста мощностью 0,03–0,1 мм, иногда менее 0,03 мм. К участкам развития антигорита приурочены вкрапления и редкие жилки брусита размером 0,01–0,05 мм и мощностью 0,01–0,02 мм, а также офита 0,01–0,1 мм.

Асбестоносность представлена просечками продольного строения. Волокно светло-серое нормальной прочности.

*Образец В-31.* Антигорит-офит-хризотиловый серпентинит, карбонатизированный, аподунитовый. Состав, %: хризотил – 50, антигорит – 5, магнетит – 5, карбонат – 10, брусит – 10, офит – 20. Структура неравнозернистая, порфиробластическая, афанитовая.

Макроскопически порода обладает тонкозернистым строением, вплоть до афанитовой, и многочисленными прожилками хризотил-асбеста, мощность некоторых из

них достигает 2–3 мм. В керновом срезе – типичный змеевик (подобный змеиной шкуре), а в сколе – с многочисленными вкраплениями магнетита.

В шлифе при 5-кратном увеличении обладает весьма неоднородной текстурой, обусловленной наличием многочисленных темно-серых прожилков разной направленности, вкраплений рудного и агрегатов брусита.

При 50-кратном увеличении в проходящем свете микроскопа также выявляется неоднородность породы, но которая обусловлена уже внутренним ее строением, а именно разномзернистостью отдельных минералов и их агрегатов: криптокристаллического офита, тонковолокнистого хризотила, таблитчатого антигорита. Неоднородность породе придают также различной мощности (0,01–0,5 мм) и размерности (0,001–0,05 мм) прожилки и вкрапления хризотил-антигоритовой массы.

Рудные прожилки сопровождаются жилками поперечно-волоконистого хризотила мощностью 0,15–0,5 мм, причем рудное вещество располагается внутри этих жилок хризотила.

Хризотил – наиболее распространенный минерал образца. Чаще он образует субпараллельные прожилки поперечно-волоконистого строения. Прожилки не сплошные, а разделены на сегменты длиной 0,1–0,5 мм тонкими (до 0,005 мм) короткими (0,01–0,03 мм) игольчатыми агрегатами того же минерала. Мощность их варьирует от 0,01 до 0,5 мм. Характерна зональность: центральная часть выполнена рудным, а периферическая состоит из 3–5 зон чередующихся тонких (0,01–0,03 мм) полосок хризотила и хризотил-асбеста. Кроме того, хризотил «плетет» характерные сетки, окружающие ячейки офита, а также образует лучистые агрегаты размером до 0,3 мм.

Антигорит по распространенности уступает хризотилу, но по размерности индивидуальных намного превышает его. Так ячейки многогранников, выполненных одной пластинкой антигорита, имеют размеры 0,1–0,2 мм, а кристаллы бастита – 0,5–1,0 мм.

Карбонат в виде мелких рассеянных вкраплений неравномерно распространен среди поля развития хризотилковых агрегатов.

Сидеритовые прожилки мощностью до 0,5 мм представляют звенья цепочки, вытянутые в одном направлении на 1,5–2,0 мм. По мере утонения прожилка (0,1–0,2 мм и менее) уменьшается и длина этих агрегатов и, в конце концов, они превращаются в одиночные вкрапления размером 0,01–0,03 мм.

Жилки рудного располагаются более хаотично, мощность их составляет от 0,5–1,0 до 0,01–0,02 мм, длина 0,5–2,0 мм. Кроме того, часто магнетит образует скопления весьма неправильной формы размером от 0,1 до 0,5–2,0 мм, состоящих из нескольких более мелких агрегатов или отдельных зерен. Иногда он сопровождается жилками сидерита, располагаясь то в центре последнего, то по его краям.

Вкрапления брусита характеризуются шестигранными пластинками размером 0,01–0,05 мм, окруженными каймой (0,005–0,01 мм) серпентина. Распределены крайне неравномерно.

Волокно хризотил-асбеста светло-серое нормальной прочности.

*Образец А-16.* Антигоритовый апогарцбургитовый серпентинит с преобладанием антигорита, апогарцбургитовый. Минеральный состав, %: антигорит – 75, хлорит – 15, рудный – 10, хризотил – 3.

Основная ткань горной породы сложена микрочешуйчатым антигоритом. На этом фоне выделяются рыжеватые пятна, сложенные микрочешуйчатым хлоритом (пеннином – разновидностью клинохлора), и относительно крупные чешуйки оптически однообразно ориентированного антигорита, которые воспроизводят контур замещенного ими пироксена (энстатита). Содержание хлоритовых и антигоритовых псевдоморфоз 15–20 %. Характерно практически полное отсутствие петельчатого магнетита. Магнетит представлен таблитчатыми или слабо вытянутыми зернами размером до 1,5–2,0 мм. Как правило, крупные зерна имеют неровные, изрезан-

ные края и сопровождаются более мелкими зернами, а также рыжеватым микрочешуйчатым хлоритом.

Асбестоносность представлена жилками и просечками хризотил-асбеста поперечно- и продольно-волокнистого строения. Волокно светло-зеленое ломкое.

*Образец Г-42.* Хризотил-антигоритовый серпентинит, апопироксенитовый. Минеральный состав, %: антигорит – 40, хризотил – 40, рудный – 10, брусит – 7, карбонат – 3. Текстура массивная, прожилковая. Структура криптокристаллическая, сетчато-ячеистая.

Макроскопически темно-зеленая до черной криптокристаллическая порода, рассеченная прожилками брусита мощностью до 2 мм. В шлифе при 5-кратном увеличении наблюдается весьма неоднородная масса, состоящая из светлых и зеленоватых полосок мощностью 1–2 мм и субпараллельных жилок магнетита мощностью 0,5–1,0 мм.

В проходящем свете микроскопа при 50-кратном увеличении наблюдаются многочисленные пластинки и бруски антигорита размером 0,1–0,5 до 0,5 × 1,0 мм, пронизанные тончайшими (0,005–0,01 мм) жилками хризотила поперечно-волокнистого строения, карбоната с многочисленными вкраплениями рудного и одного магнетита мощностью 0,01–0,1 мм и длиной 0,05–2 мм. Магнетит также испещряет мелкой пылью основную массу серпентинов. Часть рудных жилок сопровождается бруситом, который и самостоятельно рассекает брусочки и листочки антигорита. Хризотилковые полоски также окаймляют антигоритовые агрегаты, образуя сетчато-ячеистую структуру породы.

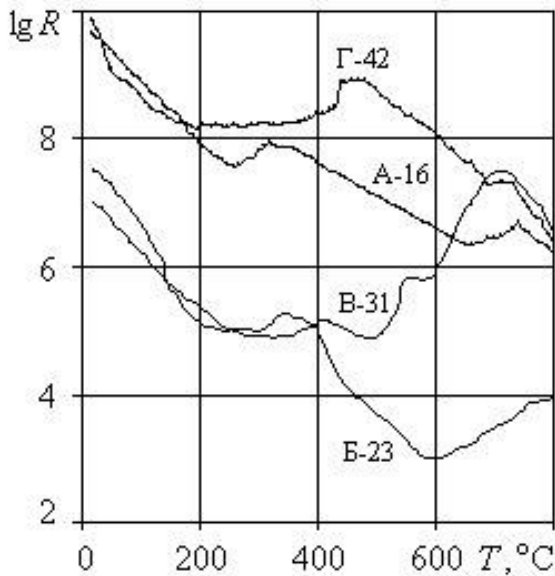
Одной из самых значительных отличий данного образца и целой группы образцов является порфиробластические, идиоморфнобластические структуры и наличие бастита – псевдоморфоз серпентиновых минералов по пироксену. Из текстурных особенностей следует отметить массивность пород с небольшим присутствием вкраплений и малым количеством жильных образований.



Асбестоносность представлена жилками и просечками поперечно- и продольно-волоконного строения. Волокно светло-зеленое, белое ломкое.

**Результаты и их обсуждение**

Кажущееся однообразие описанных серпентинитов обманчиво. Это подтверждается и данными термогравиметрического анализа (Бахтерев, 2007), что отразилось на характере электропроводности при высоких температурах. На рис. 2 приведены температурные зависимости электрического сопротивления описанных образцов (Б-23, В-31, А-16, Г-42). Особенностью исследованных образцов является широкий диапазон электрического сопротивления при нормальной температуре (около 3-х порядков) между парами образцов Б-23, В-31 (с хризотил-асбестом нормальной прочности) и А-16, Г-42 (с хризотил-асбестом ломким). Начальный участок (20–400 °С) кривой  $\lg R = f(T)$  всех исследованных образцов серпентинитов характеризуется уменьшением электрического сопротивления с сохранением указанного диапазона. При температурах выше 400 °С сопротивление меняется сложным и неодинаковым для всех образцов образом. Четко прослеживается различный характер поведения кривых  $\lg R = f(T)$  серпентинитов, обуслов-



**Рис. 2.** Температурные зависимости электрического сопротивления исследованных серпентинитов

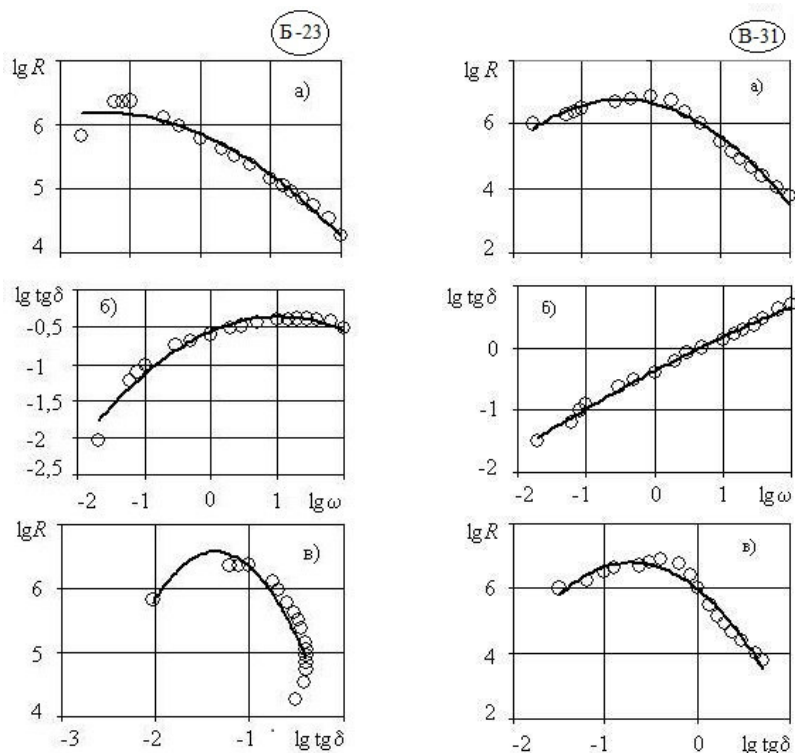
ленный минеральным составом, структурными и текстурными особенностями конкретного образца. Активное сопротивление, измеренное при переменном напряжении частотой 1 кГц при нормальной температуре, всех четырех образцов находится в пределах одного порядка.

На рис. 3 и 4 приведены частотные зависимости активного сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь и  $\lg R = f(\lg \text{tg} \delta)$  образцов серпентинитов с хризотил-асбестом «нормальной прочности» (Б-23, В-31), «ломким» (А-16, Г-42), а в таблице – корреляционные уравнения. Для остальных образцов (А, Б, В, Г) получены аналогичные результаты.

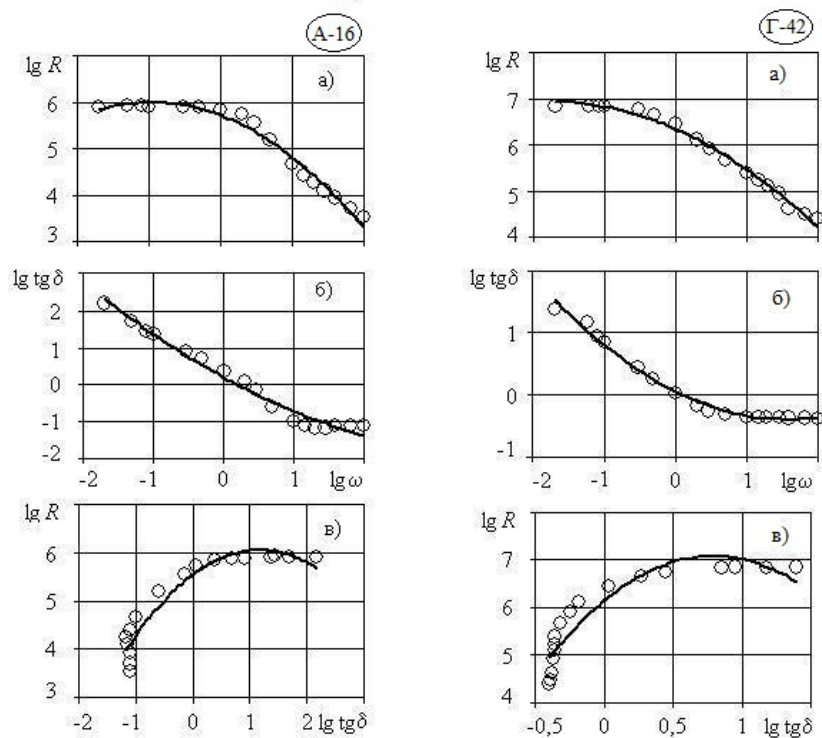
Характер зависимостей  $\lg R = f(\omega)$  и  $\text{tg} \delta = f(\omega)$  образцов серпентинитов с хризотил-асбестом нормальной прочности и ломким различный. Кривые  $\lg R = f(\omega)$  образцов нормальной прочности имеют экстремумы на различных частотах (в интервале 10–1200 Гц); для конкретных образцов – 10 Гц (образец Б-23) и 1000 Гц (образец В-31). С увеличением этих частот до 100 кГц сопротивление образца Б-23 уменьшается на два порядка, а образца В-31 – на три порядка. Диэлектрические потери растут для обоих образцов, причем для образца В-31 почти линейно чуть более 2-х порядков; для образца Б-23 – на частоте 1 кГц, достигая одного порядка, а далее – чуть-чуть, обозначив на кривой  $\text{tg} \delta = f(\omega)$  еле заметный экстремум на частоте 10 кГц.

Электрическое сопротивление образцов серпентинитов с ломким хризотил асбестом в интервале частот 10–500 Гц не зависит от частоты, а далее уменьшается почти на три порядка при частоте 100 кГц. Диэлектрические потери уменьшаются на 3 (образец А-16) и 2 (образец Г-42) порядка в интервале частот 10–10000 Гц, далее до 100 кГц – не зависят от частоты.

Для частотного диапазона (0,01–100) кГц выявлена связь между электрическими параметрами  $\lg R = f(\lg \text{tg} \delta)$ . Корреляционные уравнения для образцов серпентинитов с различным качеством асбеста различны. Для образцов одного качества



**Рис. 3.** Частотные зависимости активного сопротивления (а), тангенса угла диэлектрических потерь (б) и  $\lg R = f(\lg \operatorname{tg} \delta)$  (в) образцов серпентинитов с хризотил-асбестом «нормальной прочности» (Б-23, В-31)



**Рис. 4.** Частотные зависимости активного сопротивления (а), тангенса угла диэлектрических потерь (б) и  $\lg R = f(\lg \operatorname{tg} \delta)$  (в) образцов серпентинитов с хризотил-асбестом «ломким» (А-16, Г-42)

Таблица

Образец № А-16		Образец № Б-23	
$R^2$	Уравнение корреляции	$R^2$	Уравнение корреляции
0,98	$\lg R = 5,71 - 0,59 \cdot \lg \omega - 0,31 \cdot (\lg \omega)^2$	0,96	$\lg R = 5,85 - 0,47 \cdot \lg \omega - 0,17 \cdot (\lg \omega)^2$
0,98	$\lg \text{tg} \delta = 0,20 - 0,10 \lg \omega + 0,12 (\lg \omega)^2$	0,95	$\lg \text{tg} \delta = -0,56 + 0,39 \lg \omega - 0,19 (\lg \omega)^2$
0,92	$\lg R = 5,54 + 0,88 \lg \text{tg} \delta - 0,37 (\lg \text{tg} \delta)^2$	0,74	$\lg R = 3,26 - 4,87 \lg \text{tg} \delta - 1,79 (\lg \text{tg} \delta)^2$
Образец № Г-42		Образец № В-31	
$R^2$	Уравнение корреляции	$R^2$	Уравнение корреляции
0,99	$\lg R = 6,33 - 0,67 \cdot \lg \omega - 0,19 \cdot (\lg \omega)^2$	0,98	$\lg R = 6,66 - 0,48 \cdot \lg \omega - 0,55 \cdot (\lg \omega)^2$
0,99	$\lg \text{tg} \delta = 0,06 - 0,58 \lg \omega + 0,18 (\lg \omega)^2$	0,99	$\lg \text{tg} \delta = -0,37 + 0,58 \lg \omega - 0,03 (\lg \omega)^2$
0,87	$\lg R = 6,14 + 2,38 \lg \text{tg} \delta - 1,50 (\lg \text{tg} \delta)^2$	0,96	$\lg R = 5,99 - 2,29 \lg \text{tg} \delta - 1,60 (\lg \text{tg} \delta)^2$

хризотил-асбеста уравнения аналогичны, различаются только коэффициентами (таблица).

Сопоставим результаты частотных зависимостей (см. рис. 2 и таблицу) с параметрами высокотемпературной электропроводности (см. рис. 1). Образцы Б-23 и В-31 на рис. 1 находятся в области расположения хризотил-асбеста нормальной прочности. Совпадают также частотные характеристики и корреляционные уравнения. Образцы А-16 и Г-42 находятся в одной области «ломкого хризотил-асбеста» (см. рис. 1), более того, области распределения фигуративных точек А и Г совпадают. Совпадают также частотные характеристики и корреляционные уравнения.

Таким образом, по частотным параметрам и параметрам высокотемпературной электропроводности исследованные серпентиниты уверенно разделяются по качеству, вмещающего хризотил-асбеста.

#### Заключение

Исследованы электрические параметры образцов серпентинитов: антигоритовый апогарцбургитовый (А-16), хризотил-антигоритовый аподунитовый (Б-23), антигорит-офит-хризотилитовый, карбонатизированный аподунитовый (В-31), хризотил-антигоритовый апопироксенитовый (Г-42). Образцы отличаются минеральным составом, различны по физическим и физико-химическим параметрам, отличаются качеством (прочностью на разрыв) связанного с ними хризотил-асбеста.

Измерены электрическое сопротивление

и тангенс диэлектрических потерь образцов серпентинитов в частотном интервале (0,01–100) кГц. Выявлен различный характер зависимостей  $\lg R = f(\omega)$  и  $\lg \text{tg} \delta = f(\omega)$  образцов серпентинитов с хризотил-асбестом нормальной прочности и ломким. Установлена связь  $\lg R = f(\lg \text{tg} \delta)$  для исследованного частотного диапазона. Корреляционные уравнения для образцов серпентинитов с различным качеством асбеста различны:  $\lg R = a + b \lg \text{tg} \delta - c (\lg \text{tg} \delta)^2$  – хризотил-асбест ломкий,  $\lg R = a - b \lg \text{tg} \delta - c (\lg \text{tg} \delta)^2$  – нормальной прочности. Для образцов серпентинитов, одного качества, корреляционные уравнения  $\lg R = f(\lg \text{tg} \delta)$  аналогичны, различаются только коэффициентами.

Ранее (Бахтерев, 2007) была установлена связь между прочностью волокна хризотил-асбеста и параметрами высокотемпературной электропроводности вмещающих его серпентинитов (энергии активации  $E_0$  и коэффициента электрического сопротивления  $\lg R_0$ ).

Комплекс электрических параметров (температурных и частотных зависимостей электрического сопротивления и диэлектрических потерь) серпентинитов, вмещающих хризотил-асбест, позволяет однозначно оценить качество хризотил-асбеста технологическими терминами: «ломкий», «нормальной прочности».

#### Литература

Авраменко В.П., Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х. Электропроводность монокристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  на переменном токе // Физика твердого тела. 1980. Т. 22. № 10.

С. 3149–3152.

*Аксельрод С.М.* Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. 2012. Вып. 214. С. 78–113.

*Артемов В.Р., Кузнецова В.Н.* Классификация серпентинов // Вопросы методики поисков, разведки и промышленной оценки месторождений хризотил-асбеста. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1976. С. 38–54.

*Астраханцев Г.В., Улитин Р.В.* Комплексная электропроводность горных пород на звуковых частотах и способы ее изучения в полевых условиях // Электрометрия при поисках сульфидных месторождений: Сборник. Свердловск, 1968. С. 41–47. (Тр. Ин-та геофизики УФАН СССР. № 8).

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

*Бахтерев В.В.* Оценка формационной принадлежности гипербазитов Урала по параметрам их высокотемпературной электропроводности // Докл. РАН. 2004. Т. 398. № 3. С. 371–373.

*Бахтерев В.В.* О возможной связи параметров высокотемпературной электропроводности гипербазитов, вмещающих хризотил-асбест, с качеством хризотил-асбеста (прочностными характеристиками) // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 10. С. 1105–1112.

*Бахтерев В.В.* О частотной зависимости активного сопротивления и диэлектрических потерь некоторых минералов и руд в переменном электрическом поле // Фундаментальные и прикладные научные исследования: Мат-лы междунар. научно-практической конф. Самара: ООО «Офорт», 2016. С. 358–360.

*Бахтин А.И.* Кристаллохимия серпентинов по данным оптической спектроскопии // Геохимия. 1981. № 4. С. 613–616.

*Башта К.Т.* Особенности строения и механизм формирования жил хризотил-асбеста // Добыча и обогащение асбестовых руд. Асбест, 1980. Вып. 22. С. 3–24. (Тр. Ин-та ВНИИПроектаасбест).

*Бердичевский М.Н., Губатенко В.П., Светов Б.С.* Частотная дисперсия электриче-

ских свойств макроанизотропной среды // Физика Земли. 1995. № 9. С. 42–48.

*Булатов В.Ф.* Кристаллохимия промышленных минералов в решении задач прикладной минералогии по данным мессбауэровской спектроскопии: Автореф. дис. ... доктора геолого-минералогических наук. Казань, 2012. 48 с.

*Булатов В.Ф., Ивойлова Э.Х.* Структурные особенности хризотил-асбеста по данным мессбауэровской спектроскопии // Минералогический журнал. 1985. Т. 7. № 2. С. 22–29.

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

*Варлаков А.С.* Серпентины ультраосновных пород Урала // Уральский минералогический сборник. 1999. № 8. С. 78–101.

*Воларович М.П., Валеев К.А., Пархоменко Э.И.* Удельное сопротивление горных пород в постоянном и переменном электрических полях // Физика Земли. 1965. № 5. С. 51–56.

*Вотяков С.Л., Чащухин И.С., Щапова Ю.В., Юрьева Ю.В., Галахова О.Л., Семенкин В.А., Ивановский А.Л.* О кристаллохимии антигортитов // Ежегодник-2001 ИГиГ. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. С. 172–184.

*Гаргацев И.О., Гусейнов А.А.* Температурно-частотная зависимость диэлектрических параметров некоторых горных пород // Физика Земли. 2001. № 11. С. 97–100.

*Геладзе Г.Г., Челидзе Т.Л.* О зависимости высокотемпературных электрических свойств дисперсного кварца от размера зерен // Физические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах: Мат-лы IV Всесоюзного совещания 9–13 октября 1974 г., г. Тбилиси. Тбилиси: Изд-во Мицниереба, 1974. С. 125–129.

*Горбань И.А., Динариев О.Ю., Сафонов С.С.* Исследование влияния микроструктуры горных пород на макроскопические теплофизические свойства // Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть III. Аэрофизика и космиче-

- ские исследования. Т. 2. М.: МФТИ, 2009. С. 24–27.
- Жухлистов А.П. Дефекты укладки слоев в лизардитах 1Т по данным дифракции электронов и моделирования дифракционных эффектов // Кристаллография. 2011. Т. 56. № 1. С. 123–127.
- Зеливянская О.Е. Физика горных пород. Учебное пособие. Ставрополь: Изд-во Сев-Каз ГТУ, 2010. 103 с.
- Звягин Б.Б. Кристаллохимические особенности серпентиновых минералов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1981. № 11. С. 106–117.
- Зинчук Н.Н., Мельник Ю.М. О возникновении секторально гаснущей структуры в серпентинитах // Закономерности эволюции Земной коры: Тезисы докладов международной конференции. Т. II. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 1996. С. 249.
- Зырянов В.А. Особенности структуры и асбестоносности Западной полосы Баженовского месторождения асбеста // Добыча и обогащение асбестовых руд. Асбест, 1977. Вып. 19. С. 17–21. (Тр. Ин-та ВНИИ-Проектасбест).
- Зырянов В.А. Стадийность, направленность и баланс вещества при процессах серпентинизации и асбестообразования на Баженовском месторождении // Добыча и обогащение асбестовых руд. Асбест, 1979. Вып. 21. С. 29–39. (Тр. Ин-та ВНИИПроектасбест).
- 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.
- Измеритель иммитанса LCR – 816/817/819/821/826/827/829. Руководство по эксплуатации. М., 2005. 26 с.
- Конеев Р.И., Кушмурадов О.К., Туресебеков А.Х. Микроминералогия – предмет, методы, применение. Ташкент: Изд-во ТГУ, 1994. 89 с.
- Кононенко И.И. Электрические свойства горных пород Урала в высокочастотном электромагнитном поле // Теория и практика электрометрии. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1972. С. 135–145.
- Крутиков В.Ф., Булатов Ф.М. Об интерпретации спектров ЭПР иона Fe<sup>3+</sup> в хризотил-асбестах с помощью ЯГР-спектроскопии // Минералогический журнал. 1985. Т. 7. № 4. С. 78–80.
- Методика определения содержания хризотил-асбеста. Асбест: АООТ НИИпроектасбест, 1999. 104 с.
- Нуеун Х.Т., Миловидова С.Д., Сидоркин А.С., Рогазинская О.В. Диэлектрические свойства композитов на основе нанокристаллической целлюлозы с триглицинсульфатом // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. Вып. 3. С. 491–494.
- Одинаев С., Махмадбегов Р.С. К статистической теории диэлектрических свойств растворов электролитов // Докл. Академии наук респ. Таджикистан. 2013. Т. 56. № 5. С. 381–388.
- Петров Ю.Ф. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982. 359 с.
- Светов Б.С. О частотной дисперсии электрических свойств среды // Физика Земли. 1992. № 4. С. 62–70.
- Судакова М.С., Владов М.Л. Зависимость диэлектрических характеристик среды от структуры и состава // Геофизика. 2011. № 2. С. 30–34.
- Талалов А.Д., Даев Д.С. Влияние пиритизации на электрические свойства горных пород в диапазоне 10<sup>3</sup>–10<sup>9</sup> Гц // Известия вузов. Геология и разведка. 2000. № 5. С. 81–88.
- Татаринов П.М. Генетические типы месторождений хризотил-асбеста // Месторождения хризотил-асбеста СССР / Под ред. П.М. Татаринова и В.Р. Артемова. М.: Недра, 1967. С. 16–25.
- Штейнберг Д.С., Чащухин И.С. Серпентинизация ультрабазитов. М.: Наука, 1977. 312 с.
- Штрюбель Г., Циммер З.Х. Минералогический словарь / Под ред. Д.А. Минеева, Т.Б. Здорик. М.: Недра, 1987. 494 с.