

Фильтрационные свойства пород Эльбрусского вулканического центра

А. В. Жариков¹, А. А. Бурмистров², В. М. Витовтова³, А. Г. Гурбанов¹

¹Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва,

²Геологический факультет МГУ, Москва,

³Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН, Черноголовка

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

С тем, чтобы выяснить возможность дегазации магмы через порово-трещинное пространство пород, были исследованы плотность, пористость и проницаемость образцов основных типов пород Эльбрусского вулканического центра. Полученные результаты были использованы для оценки скоростей фильтрации индивидуальных газов: He, Ar, Cl₂, F₂, H₂S, CO₂, H₂, O₂, H₂O. Установлено, что в рассмотренном разрезе преобладают скорости фильтрации порядка 10⁻⁵ см/с.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Эльбрусский вулканический центр; скорости фильтрации индивидуальных газов; пористость, проницаемость

Ссылка: Жариков А. В., А. А. Бурмистров, В. М. Витовтова, А. Г. Гурбанов (2010), Фильтрационные свойства пород Эльбрусского вулканического центра, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6012, doi:10.2205/2010NZ000030, 2010

На склоне Эльбруса были обнаружены «столбы» ярко белого свечения, высотой до 100 - 150 м (**рис. 1**), которые появились в солнечную погоду и наблюдались в течение 2^х часов над тепловой аномалией №2А (**рис. 2**) и около 40 минут, под Восточным вершинным кратером.



Рис. 1. Столб свечения под ледником Малый Азау, напротив станции канатной дороги «Мир». Фото Цукановой Л.Е.

Результаты геолитарной и водородной съемок [Алексеев и др., 2009] показали, что с местом выхода «столба» совпадает отчетливо выраженный пик концентрации водорода (**рис. 2**).

Упомянутая выше тепловая аномалия, как и другие, представленные на **рис. 3**., устойчивы в течение последних 10 лет и вызваны магматическими камерами глубина кровель, которых варьирует от 2^х до 4^х км, а подошв – 8-10 км [Корниенко и др., 2005]. Наличие эндогенных источников тепла, в виде расплава, доказано данными магнитотеллурического зондирования и гравиметрических исследований [Собисевич и др., 2003].

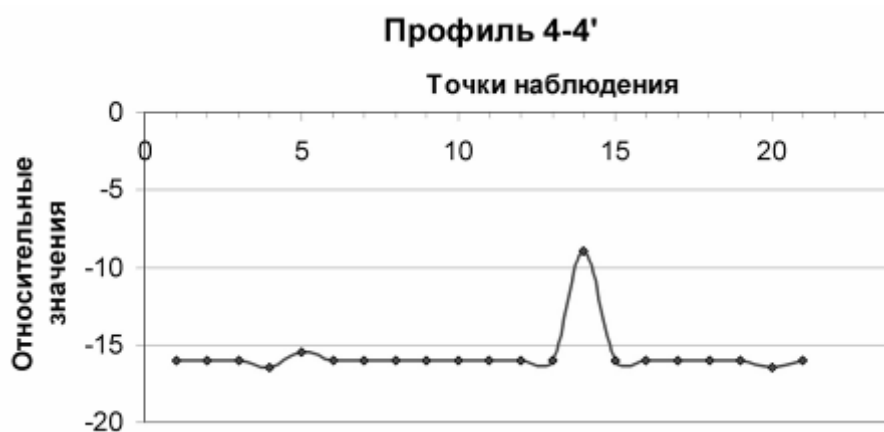


Рис. 2. Концентрации водорода вдоль профиля от станции «Мир» в сторону ледника Малый Азау.

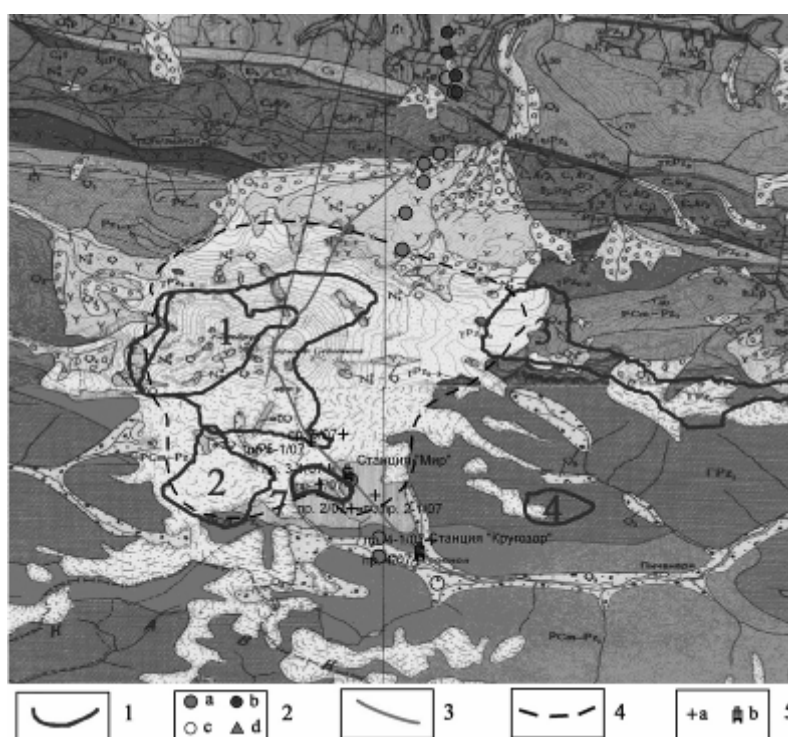


Рис. 3. Проекция магматических камер на земную поверхность.

Для выяснения принципиальной возможности дегазации расплава через поры и микротрещины в вулканитах, залегающих над камерами, были изучены плотность, проницаемость, пористость и параметры, характеризующие поровое пространство, образцов основных типов пород, слагающих Эльбрусский вулканический центр.

Полученные результаты приведены в **таблицах 1 и 2**. Проницаемость определена нестационарным методом, модифицированным с учетом изменения термодинамических свойств фильтрующегося газа [Мальковский и др., 2009]. Определение плотности (d), эффективной пористости ($P_{эф}$), а также условно-мгновенного насыщения (A) образцов проводилось методом свободного насыщения образцов в воде и гидростатического взвешивания [Бурмистров и др., 2009]. Были определены также времена полунасыщения ($T_{1/2}$) – времена насыщения половины объема эффективной пористости, после первой минуты (условно-мгновенного насыщения - A), высокие значения которых показывают, что основная доля пор представлена мелкими классами, или имеются каналы сложной формы (с раздувами и пережимами).

ЖАРИКОВ И ДР.: ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

Сочетание исследований методом свободного насыщения и измерений электрического сопротивления (Руд) образцов, насыщенных водой, позволило определить коэффициенты изменчивости эффективных диаметров пор (Кформ) и их извилистости (Изв). Были рассчитаны также величины теоретического времени насыщения, соответствующие заполнению прямого капилляра с круглым поперечным сечением постоянного радиуса с постоянной скоростью. Методика определения упомянутых выше параметров подробно изложена в [Бурмистров и др., 2009].

Экспериментальные данные показывают, что реальное время насыщения образцов обычно гораздо больше теоретического даже для мелких пор (десятки минут - первые часы). Оценка частот встречаемости пор разных размеров в различных типах пород, проведенная методом микроморфологии с помощью растрового электронного микроскопа показала, что распределение пор по диаметрам логнормальное, т.е. число самых мелких пор на несколько порядков, больше чем крупных и средних [Бурмистров и Соколов, 2007]. Одной из причин медленного насыщения является наличие воздуха в порах. Насыщение пород в вакууме по нашим данным составило от нескольких часов до 1-2 суток. По всей вероятности уменьшению скорости фильтрации также способствует значительная изменчивость формы пор (резкие пережимы и раздувы) и пересечения каналов разного размера, которые также видны на микрофотографиях образцов.

Таблица 1. Плотность, пористость и проницаемость образцов основных типов пород Эльбрусского вулканического центра

Номер образца	Порода (сокращенное обозначение)	Место отбора	Плотность (г/см ³)	Пористость (%)	Проницаемость (м ²)
2/99	трахиандезит (тр\анд)	р.Худес	2.66	0.82	3.74·10 ⁻²¹
50/8	андезибазальт (ан\баз)	Тызыльская вулканическая постройка	2.48	8.39	1.65·10 ⁻¹⁸
22/4	дацит (д)	Уллукам	2.51	2.30	4.92·10 ⁻¹⁷
31/57	дацит	Голоценовый поток в 200 м выше станции «Мир»	2.40	2.63	9.50·10 ⁻¹⁷
66/1-6	дацит	Сылтранская вулканическая постройка	2.38	3.63	2.88·10 ⁻¹⁶
197	дацит	-	2.60	5.30	2.30·10 ⁻¹⁷
20/99	дацит	Большой Азау	2.40	6.79	1.77·10 ⁻¹⁶
54/99	субинтрузивный дацит (д)	Сылтранская вулканическая постройка	2.10	10.40	2.63·10 ⁻¹⁷
22/3	дацит	Уллукам	2.24	10.80	1.24·10 ⁻¹⁷
33-2/99	туфобрекчия (ТУФ\БР)	Маркирующий уровень р. Бийтик – Азау	2.38	6.65	8.22·10 ⁻¹⁷
635	игнимбрит (и)	Перевал Ирикчат	2.23	11.00	6.24·10 ⁻¹⁹
646	эруптивная брекчия (э\бр)	Перевал Ирикчат	2.36	15.20	1.48·10 ⁻¹⁷
20/97	туф риолитового состава (туф)	Левый исток р.Бийтик – Тебе	2.06	21.30	1.18·10 ⁻¹⁵

80к II *	игнимбрит	Чуч – кур	1.89	22.30	$2.45 \cdot 10^{-15}$
80к+*	игнимбрит	-	2.04	20.20	$4.32 \cdot 10^{-16}$
25/1	туфобрекчия	Уллукам	1.84	23.90	$6.23 \cdot 10^{-17}$

Примечание: II фильтрация параллельно слоистости, + - перпендикулярно слоистости.

Проведенный кластерный анализ измеренных параметров показал, что они разделяются на три группы (рис. 4 и 5). Корреляционные связи между группами обратные, а внутри групп – прямые. 1-я группа показывает, что при высокой эффективной пористости обычно высоко значение и макропористости (А). Такие образцы также имеют высокое время полного насыщения в обычных условиях (Т). Это может быть связано с тем, что кроме крупных пор в них также имеется и относительно высокий объем мелких. Обратные связанные с этой группой – 2-я и 3-я свидетельствуют о том, что при невысокой и низкой пористости изученных пород типична либо высокая извилистость каналов и, соответственно, повышенное удельное сопротивление, либо они отличаются резкой изменчивостью диаметров пор. Для последнего случая характерен рост периода полунасыщения вследствие торможения насыщения в каналах с пережимами (прямая связь $T_{1/2}$ и Кформ).

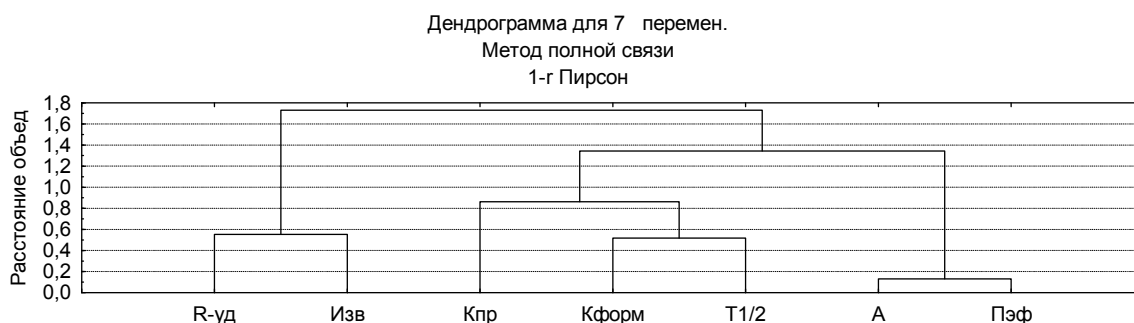


Рис. 4. Корреляционные связи изученных параметров (усл. обозначения – в тексте).

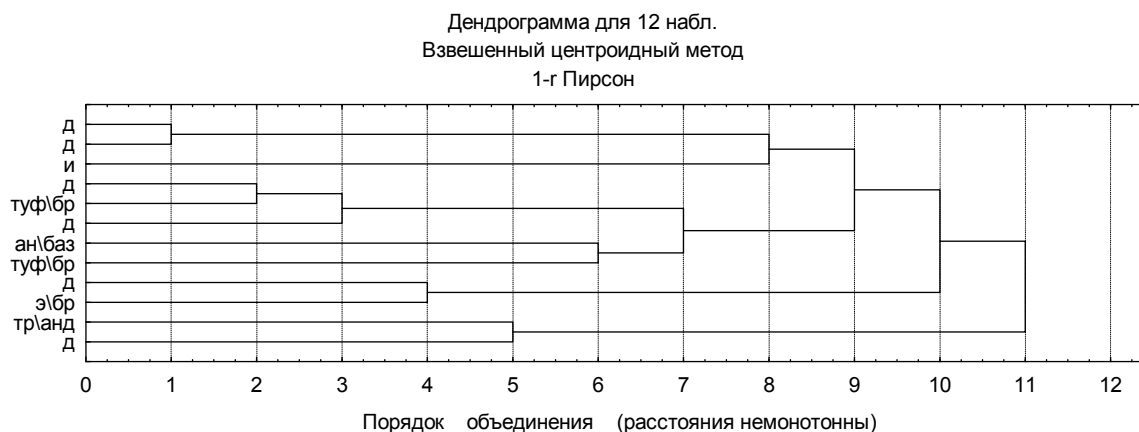


Рис. 5. Классификация образцов по значениям изученных параметров (рис. 4) (усл. обозначения – см. табл. 1).

Коэффициент проницаемости слабо связан со всеми параметрами. Поскольку он все же попадает в одну группу с $T_{1/2}$ и Кформ можно сделать предварительный вывод о том, что он несколько выше в образцах с мелкими порами, для которых характерны также малая извилистость и наличие раздувов (повышенный Кформ).

Классификация образцов по величинам свойств (рис. 5), показывает, что одни и те же породы (например, дациты) попадают в разные группы. Эти предварительные полуколичественные оценки, вероятно, свидетельствуют о том, что фильтрационные свойства пород определяются геологическими условиями их формирования и преобразования.

Плотность массивных лав больше, чем пирокластических пород, а пористость и проницаемость, напротив, – меньше. В пределах каждой из этих групп пород плотность и пористость изменяются незначительно (плотность до 1.3 раза, пористость до 4.7 раза), а

ЖАРИКОВ И ДР.: ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

изменения проницаемости более существенны: до 5 десятичных порядков среди массивных лав и до 3х в пирокластических породах.

Среди массивных лав трахиандезиты характеризуются наиболее низкими значениями обоих параметров: и пористости, и проницаемости, а андезитобазальты при низких значениях проницаемости обладают достаточно высокой пористостью. Трахиандезиты, как андезитобазальты является докальдерными образованиями, излившимися до образования современной вулканической постройки Эльбруса [Гурбанов и др., 2004]. Следовательно, проницаемость пород докальдерного этапа формирования Эльбрусского вулканического центра значительно (на несколько десятичных порядков) меньше, чем у дацитовых лавовых потоков кальдерного и посткальдерного этапов. Пористость дацитов изменяется в 4.6 раза (2.3 – 10.80 %), а проницаемость в 76 раз ($1.24 \cdot 10^{-17}$ – $2.88 \cdot 10^{-16}$ м²). Значения величин этих параметров разбросаны относительно равномерно в интервале от минимального до максимального. Поэтому, было не корректно вычислять и приводить средние значения этих параметров и дисперсии. Те же закономерности поведения пористости и проницаемости наблюдаются у пирокластических пород. Для них характерны изменения пористости в несколько раз, проницаемости – на несколько порядков, а значения этих параметров разбросаны по всему интервалу. Среди этих пород игнимбриты (обр. 635) выделяются аномально низкой проницаемостью, а обр. 33-2/99 - низкой пористостью. Отметим, что если даже исключить эти образцы из выборки, то общая картина не изменится.

Таблица 2. Параметры динамики насыщения и структуры порового пространства образцов

№ обр.	Удельное сопротивление Rуд, кОм*мм	Условно-мгновенное насыщение А, %	Период полунасыщения T1/2, Ч	Период насыщения в воздухе, ч	Параметр извилистости (Изв)	Параметр изменчивости формы и сечения пор (Кформ)
54/99	720	1.3	25.8	1020	2.5	1.5
50/8	964	0.4	1.5	1020	2.1	1.7
635	771	0.3	1.4	600	2.3	1.6
2/99	12688	0.0	4.1	1000	3.0	1.4
197	559	1.3	1.4	770	1.5	2.2
646	319	6.7	1.2	1000	2.2	1.7
22/3	368	3.0	1.4	1000	1.8	1.9
33-2/99	692	3.4	1.2	1000	2.2	1.7
31/57	1700	0.2	28.9	930	1.8	3.0
20/99	1118	0.8	1.4	600	2.2	1.7
25-1	850	2.6	2.8	1020	3.2	1.2
22/4	4068	0.2	1.3	600	2.0	1.8

Между плотностью и пористостью, как в пределах всей выборки, так и в пределах каждой из групп пород, имеется устойчивая обратная корреляция (значение коэффициента корреляции - 0.90). Между пористостью и проницаемостью, напротив, корреляция отсутствует как в пределах всей выборки, так и в каждой из групп пород. Это свидетельствует о том, что, несмотря на высокие значения пористости, крупные изометричные поры, наблюдающиеся в образцах некоторых дацитовых потоков, не значительно влияют на проницаемость массивных лав. Последняя, в дацитовых лавах, определяется не порами, а микротрещинами, а в пирокластических породах – и порами, и трещинами. Причины такого поведения пористости и проницаемости, очевидно, зависят от особенностей текстур и микроструктур пород.

Результаты петрофизических исследований были использованы для оценки скоростей фильтрации индивидуальных газов: He, Ar, Cl₂, F₂, H₂S, CO₂, H₂, O₂, H₂O. При расчетах были использованы следующие допущения. Фильтрация в вертикальном направлении, подчиняющаяся закону Дарси [Лэк, 1968], происходит через поровое пространство горизонтальных слоев, представляющих основные типы пород Эльбрусского вулканического центра (снизу вверх по разрезу: граниты, гнейсы, игнимбриты, дациты, туфы-туфобрекчи-

эруптивные брекчии. Для вычислений использованы осредненные значения проницаемости пород Эльбрусского вулканического центра (табл. 1) а также о результаты определений проницаемости гранитов и гнейсов при высоких PT -параметрах [Шмонов и др., 2002]. Флюидное давление равно литостатическому и изменяется по гидростатическому закону от 0.1 МПа на поверхности до 99.7 МПа на глубине 4000 м [Наумов и др., 2002]. Таким образом, средний градиент давления составляет 0.02 МПа/м. Вязкости индивидуальных газов при соответствующих PT -параметрах взяты из [Зубарев и др., 1989]. Результаты вычислений показали, что основным параметром, определяющим величины скоростей фильтрации, является проницаемость пород. Значения проницаемости пород, слагающих Эльбрусский вулканический центр, достаточно высокие, поэтому в рассматриваемом разрезе преобладают скорости фильтрации порядка 10^{-5} см/с. В средней части разреза находится слой гнейсов, скорости в котором на два десятичных порядка меньше ($\sim 10^{-7}$ см/с), однако его, мощность, очевидно, не достаточна, чтобы оказать существенное влияние на средние скорости фильтрации во всем разрезе, которые составляют $\sim 10^{-5}$ см/с. Наибольшие значения отмечаются у H_2 , CO_2 , H_2O . Значения скоростей фильтрации Ar , F_2 – в два раза меньше. Следует отметить, что значения $\sim 10^{-5}$ – характеризуют очень высокие фоновые скорости. Например, результаты компьютерного моделирования формирования рудообразующих систем, контролируемых глубоко проникающим высокопроницаемым разломом, в [Пэк и Мальковский, 1997] показали, что для образования золоторудных месторождений достаточными могут быть и меньшие фоновые скорости фильтрации рудоносных флюидов: порядка $5 \cdot 10^{-8}$ см/с.

Отметим, что образцы вулканических пород для изучения физических свойств специально отбирались вдали от зон активных и кальдерообразующих разломов. Естественно, в современных активных разломах скорости фильтрации значительно выше фоновых. Именно к таким структурам, соединяющим магматические камеры с земной поверхностью, очевидно, и приурочено появление «столбов» ярко-белого свечения (рис. 1), а также аэрозольных «облаков» и аномалий водорода.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 07-05-00485 и 08-05-00855; Ведущей научной школы НШ-450. 2008.5 и Программы 4 Президиума РАН.

Литература

- Алексеев В. А., Н. Г. Алексеева, А. В. Бобков, М. Г. Дканиялов (2009), Изучение вулканических аэрозолей на вулканах Авачинский, Корякский, Эльбрус. Связь потока аэрозолей с деформациями поверхности, *Магматизм и рудообразование. Матер. конференции посвященной 125-летию со дня рождения акад. А.Н. Заварицкого. 18-19 марта 2009 г.* ИГЕМ РАН, Москва, с. 10-12.
- Бурмистров А. А., В. И. Старостин, А. Л. Дергачев, В. А. Петров (2009), *Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых*, МАКС-ПРЕСС, Москва.
- Бурмистров А. А., В. Н. (Соколов 2007), Анализ связи динамики насыщения пород со структурой их порового пространства, *М-лы 8-й международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*, ОИФЗ РАН, Москва, с. 14-16.
- Гурбанов А. Г., О. А. Богатилов, И. В. Мелекесцев и др. (2004), Вулканическая опасность на севере Кавказского региона, *Новейший и современный вулканизм на территории России*, (ред. Н.П. Лаверов), Наука, Москва, с. 336-432.
- Корниенко С. Г., О. В. Ляшенко, А. Г. Гурбанов, А. Л. Собисевич, А. Б.Лексин, Д. В. Лиходеев (2005), Проблемы мониторинга периферических магматических камер под Эльбрусским вулканическим центром по данным тепловой космической съемки, *Современные методы геолого-геофизического мониторинга природных процессов на территории Кабардино-Балкарии*, с. 266-276.
- В. И. Мальковский, А. В. Жариков, В. М. Шмонов (2009), Новые методы измерения проницаемости образцов горных пород для однофазного флюида, *Физика Земли*, № 2, 3-14.
- Наумов В. Б., М. Л. Толстых, А. Г. Гурбанов и др. (2001), Условия образования ксенолитов из плейстоценовых лавовых потоков вулкана Эльбрус (Кавказ), *Геохимия*, № 11, 1230–1236.
- Пэк А. А. (1968), *О динамике ювенильных растворов*. Наука, Москва.
- Собисевич А. Л., Ю. Н. Нечаев, Л. Е. Собисевич, А. Г. Гурбанов, В. Н. Арбузкин, Е. А. Трофименко, Н. И. Пруцкий, И. И. Греков (2003), Результаты геолого-геофизического

ЖАРИКОВ И ДР.: ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

- мониторинга магматических структур вулкана Эльбрус, *Современные методы геолого-геофизического мониторинга природных процессов на территории Кабардино-Балкарии*, КБГУ, Нальчик, с. 158-178.
- Пэк А. А., В. И. Мальковский (1997), Динамика рудоотложения на подвижном температурном барьере при формировании золоторудных месторождений в архейских зеленокаменных поясах, *Новые направления в изучении колчеданных месторождений*, Новочеркасский гос. Техн. Ун-т., Новочеркасск, с. 150-162.
- Зубарев В. Н., А. Д. Козлов, В. М. Кузнецов и др. (1989), *Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник*, Энергоатомиздат, Москва.
- Шмонов В. М., В. М. Витовтова, А. В. Жариков (2002), *Флюидная проницаемость пород земной коры*, Научный мир, Москва.

А. В. ЖАРИКОВ¹, А. А. БУРМИСТРОВ², В. М. ВИТОВТОВА³, А. Г. ГУРБАЛОВ¹

¹Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва (факс: +7(495)9511587, тел.: +7(499)2308440), e-mail: vil@igem.ru, ²Геологический факультет МГУ, Москва, ³Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН, Черноголовка