

НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

УДК 549.0

© В. С. ЗНАМЕНСКИЙ, * М. А. КОРЖИНСКИЙ, ** Г. С. ШТЕЙНБЕРГ, ***
С. И. ТКАЧЕНКО, ** А. И. ЯКУШЕВ, * И. П. ЛАПУТИНА, * д. чл. И. А. БРЫЗГАЛОВ, ****
Н. Д. САМОТОИН, * Л. О. МАГАЗИНА, * О. В. КУЗЬМИНА, *
д. чл. Н. И. ОРГАНОВА, * В. А. РАССУЛОВ, **** д. чл. И. В. ЧАПЛЫГИН*

РЕНИИТ, ReS_2 — ПРИРОДНЫЙ ДИСУЛЬФИД РЕНИЯ ИЗ ФУМАРОЛ ВУЛКАНА КУДРЯВЫЙ (О. ИТУРУП, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)¹

V. S. ZNAMENSKY, M. A. KORZHINSKY, G. S. STEINBERG, S. I. TKACHENKO, A. I. YAKUSHEV,
I. P. LAPUTINA, I. A. BRYZGALOV, N. D. SAMOTOIN, L. O. MAGAZINA, O. V. KUZMINA,
N. I. ORGANOVA, V. A. RASSULOV, I. V. CHAPLYGIN. RHENIITE, ReS_2 , THE NATURAL RHENIUM
DISULFIDE FROM FUMAROLE OF KUDRYAVY VOLCANO, ITURUP ISL., KURILY ISLANDS

* Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
119017, Москва, Старомонетный пер., 35;
e-mail: ichap@igem.ru или tozgovva@igem.ru

** Институт экспериментальной минералогии РАН, 142432, Черноголовка, Московская область

*** Институт вулканологии и геодинамики РАН, 693000, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25
**** Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

119899, Москва, Воробьевы горы

***** Всероссийский институт минерального сырья, 109017, Москва, Старомонетный пер., 31

Rheniite, ReS_2 , a natural rhenium disulfide, has been found among products of high temperature fumaroles of Kudriavy volcano, Iturup Island, Russia. It occurs as thin filmy (0.5–5 μm) pseudohexagonal, rhombous and least often band-shaped curved plates up to 1.5–2 mm in size. There are both individual crystals and aggregates of such crystals in fissures of fumaroles crust. Aggregates cover someplace surfaces up to 10 × 10 cm and fill up cracks up to 3–5 mm in width. Associated minerals are wollastonite, garnet of andradite-grossularite series, augite, magnetite, and sulfides: wurtzite, cadmoindite, pyrite, and some other sublimated minerals. Rheniite crystallizes from the high temperature (450–600 °C) volcanic vapors by sublimation at depth between 20 and 60 cm. Mineral has silvery-white colour, grey-black streak and metallic luster. Under reflected light rheniite is white with slight pink hue. Bireflectance is grey to pinkish grey. Anisotropy is rather strong. Mineral is translucent and has red internal reflections. Individual flakes are elastic and/or brittle. Rheniite has perfect cleavage {001} and parting with pseudohexagonal symmetry. The microhardness cannot be determined because of tiny thickness. Calculated density is 7.598 g/cm³. Chemical composition, defined by 45 electron microprobe analyses [Camebax SX-50 and Camebax Micro-beam, Cameca (WDS)], shows Re 74.30 (73.28–75.90), Mo 0.13 (0.00–0.70), S 25.46 (23.69–26.04); the sum 99.89 (99.51–100.46) wt %. Its empirical formula, calculated on 3 atoms is $\text{Re}_{1.002}\text{Mo}_{0.005}\text{S}_{1.993}$. Idealized formula is ReS_2 . The unit-cell parameters of rheniite were determined by the least squares from Guinier data on sample mixed with Si powder as an internal standard. The observed data correspond basically to those of synthetic ReS_2 (ASTM N 24-922). The strongest fifteen lines of X-ray powder diffraction pattern [d in Å(hkl)] are: 6.08 (7) (0 0 1); 2.7834 (10) (2 0 0); 2.764 (10) (0 2 1); 2.733 (10) (2 2 0); 2.642 (8) (2 2 1); 2.404 (8) (0 2 2); 2.371 (9) (2 0 1); 2.1271 (7) (1 2 1); 2.1035 (8) (3 2 0); 2.0914 (9) (1 3 1); 1.8724 (9) (3 0 1); 1.8559 (8) (3 0 0); 1.6289 (9) (2 2 1); 1.6156 (10) (4 2 0); 1.5938 (10) (2 4 1). The unit cell parameters of rheniite are: $a = 6.470$ (5) Å, $b = 6.368$ (5) Å, $c = 6.401$ (7) Å, $\alpha = 105.0$ (1)°, $\beta = 91.59$ (9)°, $\gamma = 118.90$ (6)°; $V = 219.4$ (3) Å³, $Z = 4$, Syngony is triclinic, space group P (1). Rheniite is na-

¹ Заявка впервые поступила в КНМ ВМО 22 февраля 1994 г. Минерал и его название утверждены КНМНМ ММА 31 августа 2004 г.

med after its chemical composition as the unique mineral of rhenium. Type material is deposited in Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow.

Впервые природный дисульфид рения был установлен на вулкане Усу (Bernard, Dumortier, 1986). На вулкане Кудрявый он обнаружен еще в 1992 году и неоднократно кратко описывался в литературе (Korzhinsky *et al.*, 1994; Самоин и др., 1995; Znamenskii, Yakushev, 2000). В настоящей работе приводятся результаты детального исследования этого минерала. Минерал назван по составу. Типовой материал находится в Минералогическом музее имени А. Е. Ферсмана в Москве (№ 90818, 90824, 91249).

Геологическая позиция и условия нахождения. Вулкан Кудрявый находится на севере о. Итуруп (Курильские острова) в кальдере Медвежья. Подробная геологическая и петрологическая характеристика вулкана и вмещающей его кальдеры дана Г. С. Горшковым (1967) и В. А. Ермаковым с соавторами (2001). Со времени последнего лавового извержения в 1883 году вулкан Кудрявый находится в стадии высокотемпературной фумарольной деятельности, проявленной в пределах нескольких полей на его уплощенной вершине. Максимальная температура газов в 2004 году составила 870 °С. Рениит был обнаружен при опробовании одного из таких полей и первоначально принят за молибденит. Однако первые микрозондовые анализы показали, что минерал является дисульфидом рения. Вмещающее его поле, впоследствии названное Рениевым, имеет размер примерно 50 × 20 м и расположено на крутом внутреннем склоне старого кратера в средней части удлиненной вершины (рис. 1). Стенки кратера сложены лавово-пирокластическими образованиями, представленными оливин-пироксеновыми андезито-базальтами. Рениевое поле постоянно окутано клубами плотного пара. Температуры фумарол увеличиваются от 300 до 550–600 °С с северо-западной к юго-восточной части поля, где ночью, в отдельных местах, замет-

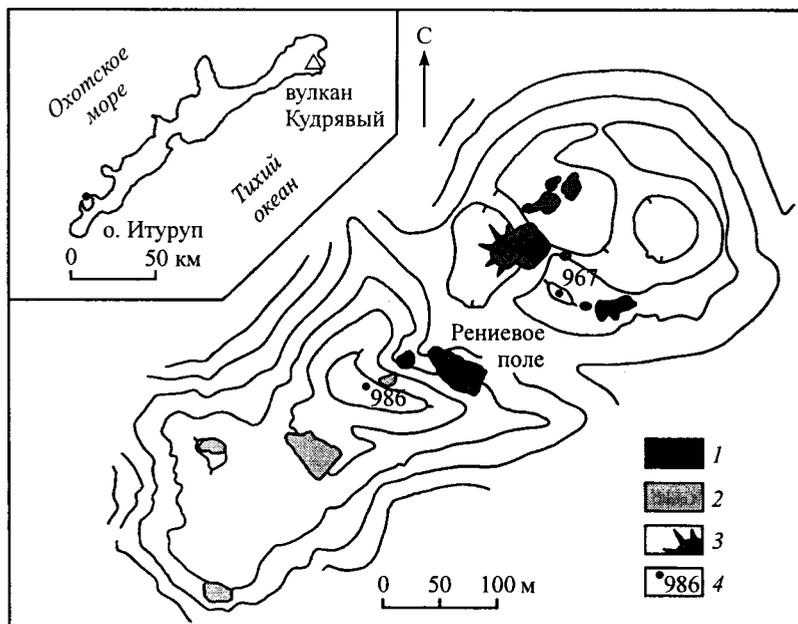


Рис. 1. Схема расположения фумарольных полей на вершине вулкана Кудрявый.

1 — высокотемпературные (>200 °С) поля; 2 — низкотемпературные (<200 °С) поля; 3 — новейший кратер от фреатического извержения 1999 года; 4 — отметки высот, м. Горизонталы проведены через 10 м.

Fig. 1. Scheme of location of the fumaroles fields at the top part of Kudryavy volcano: 1 — high-temperature fields (>200 °C); 2 — low-temperature fields (<200 °C); 3 — the crater newly formed while phreatic eruption in 1999; 4 — altitudes, m; horizontals step — 10 m.

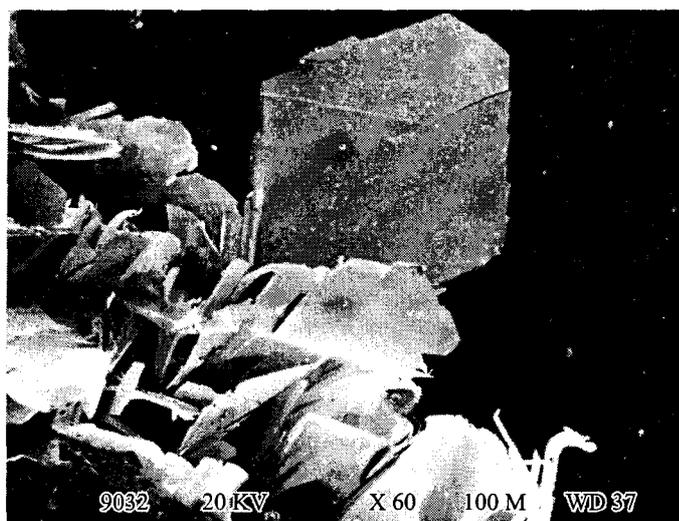


Рис. 2. Ромбовидный пластинчатый кристалл рениита на друзовом выделении более мелких кристаллов того же минерала.

Fig. 2. Rhomb-shaped lamellar crystal of reniite on a druse segregation of its smaller crystals.

но красное свечение. Породы на fumarольном поле в сильной степени изменены и покрыты коркой, сложенной преимущественно сульфатами, а по его краям импрегнированы серой.

Рениит был найден в юго-восточной части поля в закопушках на глубине 20—60 см от поверхности при температуре исходящих газов 380—560 °С. В тесной ассоциации с рениитом присутствовали магнетит, корунд, волластонит, гранат андрадит-троссулярового состава и другие сублимационные оксиды и силикаты; из сульфидов были отмечены пирит, минералы ряда вюртцит—гринокит, кадмоиндит (Чаплыгин и др., 2004). Нередко на поверхности кристаллов рениита наблюдались сульфатные налеты и отдельные кристаллы галита. Отобранные образцы содержали рениит в виде редких индивидуальных кристаллов и более частых скоплений, покрывающих поверхности размером до 10 × 10 см и заполняющих трещины шириной до 3—5 мм.

Морфология, оптические и физические свойства кристаллов рениита. Рениит представлен тонкими пластинчатыми кристаллами псевдогексагональной, ромбовидной, лентовидной формы. Кристаллы большей частью плавно изогнуты в плоскости базиса с различным радиусом кривизны и напоминают металлическую пленку (рис. 2). Размер их по ширине от долей до 1.5—2 мм при толщине 0.5—5 мкм. Размер самых больших кристаллов достигает 4 мм. Цвет минерала серебристо-белый с сильным металлическим блеском. При наблюдении под биноклем рениит слабо прозрачен и просвечивает красно-коричневым цветом. Черта темно-серая. Спайность совершенная по {001}, отдельность по {010} и {110}. Кристаллы рениита упруги, но легко разбиваются по спайности и отдельности, давая неровный излом. Твердость и плотность минерала не определены из-за малой толщины кристаллов. Плотность, рассчитанная из эмпирической формулы и параметров (см. ниже), — 7.598 г/см³.

Оптические исследования проведены на наиболее развитой {001} естественной грани кристалла, запрессованного в полистирол и предварительно проанализированного. В отраженном свете рениит белый. Двуотражение в воздухе заметное, с изменением окраски от серой до розовато-серой. Анизотропия сильная, с цветным эффектом от желтовато-серого до сиренево-синего. Заметны коричневые внутренние рефлексии.

Дисперсия отражения измерена в воздухе в диапазоне длин волн от 420 до 700 нм на автоматическом поляризационном микроспектрофотометре МСФУ-312 (ЛОМО,

Таблица 1

Дисперсия отражения рениита (%) в воздухе
Reflectance values of rheniite in air

λ , нм	R_1	R_2	λ , нм	R_1	R_2
400	46.0	43.0	560	42.6	37.7
420	44.9	41.2	580	42.3	37.7
440	44.1	39.8	589 (COM)	42.2	37.6
460	44.0	39.3	600	42.1	37.4
470 (COM)	44.1	39.1	620	42.1	37.2
480	44.0	39.0	640	42.3	37.3
500	43.7	38.6	650 (COM)	42.4	37.3
520	43.3	38.1	660	42.4	37.2
540	42.9	37.7	680	41.9	37.0
546 (COM)	42.8	37.6	700	41.1	36.4

Примечание. Стандарт — Si.

С.-Петербург) с использованием кремния в качестве стандарта. Результаты измерений (табл. 1, рис. 3) показывают, что абсолютная величина двуотражения колеблется от 3.0 до 5.2 %. Кривые дисперсии пологие, с незначительным подъемом в области низких длин волн.

Внутреннее строение кристаллов рениита сложное. При наблюдении в скрещенных николях часто наблюдаются тройники, создающие псевдогексагональный облик пластинчатых кристаллов. В отдельных индивидах тройников иногда дополнительно проявлено пластинчатое двойникование.

Для синтетического ReS_2 в проходящем свете была экспериментально установлена оптическая двуосность (Friemelt e. a., 1993). Недостаточная прозрачность природных кристаллов не позволила провести подобные исследования на природном материале.

Химический состав рениита. Предварительное изучение состава минерала выполнялось на микроанализаторе MS-46 Cameca. Анализ проводился на большинство элементов, характерных для рудной ассоциации фумарольного поля, при следующих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 15 нА; эталоны (аналитические

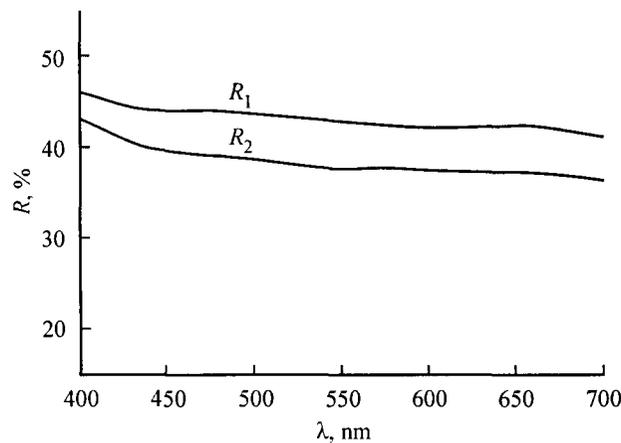


Рис. 3. Спектр отражения рениита.

Fig. 3. Reflectance spectra of rheniite.

Таблица 2

Химический состав (мас. %) рениита
Chemical composition (wt %) of rheniite

Параметр	Re	Mo	S	Сумма
Среднее содержание	74.30	0.13	25.46	99.89
Вариации содержания	73.28—75.90	0.00—0.70	23.69—26.04	99.51—100.46
Стандартное отклонение	0.47	0.21	0.46	0.22
Теоретическое содержание	74.38	0	25.62	100.00

линии): NiAs (AsK_{β}), PbSe (SeK_{α}), ZnS (ZnK_{α} , SK_{α}), CdS (CdL_{α}); чистые металлы Mo (MoL_{α}) и Re (ReM_{α}). Несколько десятков точечных анализов показали, что природный сульфид рения является весьма чистым химическим соединением. Незначительные примеси других элементов встречаются лишь в единичных анализах (мас. %): Mo до 0.68, As до 0.38, Se до 0.16, Zn до 0.22.

Окончательное определение состава с целью оценки коэффициентов в формулах проводилось лишь на три элемента — Re, Mo и S — на двух микроанализаторах: Camebax SX-50 (ускоряющее напряжение 15 кВ, ток зонда 30 нА, диаметр зонда 2—3 μm) — 10 анализов и Camebax Micro-beam (ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 15 нА, диаметр зонда 2—3 μm) — 35 анализов. Для Re и Mo применялись указанные выше эталоны и аналитические линии, для серы при анализе на Camebax SX-50 в качестве эталона использовался $Sb_2S_3(SK_{\alpha})$.

Анализы показали, что концентрации основных элементов варьируют в незначительных пределах (мас. %): Re 73.28—75.90 и S 23.69—26.04 при средних содержаниях 74.30 и 25.46 соответственно. Примесь молибдена установлена лишь в половине анализов в количестве от сотых до 0.7 мас. %, при 0.13 мас. % в среднем (табл. 2). Эм-

Таблица 3

Результаты расчета рентгенограммы рениита и синтетического соединения ReS_2
X-ray powder diffraction data of rheniite in comparison with data for synthetic ReS_2

Рениит				ReS_2 , синт. (ASTM № 24-922)		
<i>I</i>	$d_{изм.}, \text{\AA}$	$d_{выч.}, \text{\AA}$	<i>hkl</i>	<i>I</i>	$d, \text{\AA}$	<i>hkl</i>
7	6.08	6.081	001	95	6.08	001
6	5.55	5.571	100	80	5.56	100
2	5.46	5.470	$1\bar{1}0$	20	5.46	$1\bar{1}0$
1 ш	4.82	4.803	$01\bar{1}$			
5	4.529	4.536	$10\bar{1}$	70	4.54	$10\bar{1}$
1р	4.332	4.393	$1\bar{1}1$	20	4.39	$1\bar{1}1$
1	3.883	3.781	101	20	3.77	101
6	*3.500					
2	*3.353					
4	3.170	3.173	$11\bar{1}$	30	3.17	$11\bar{1}$
3	3.125	3.127	110	30	3.12	110
1	3.033	3.041	002	70	3.04	002
2	*2.964					
1	2.907	2.898	$10\bar{2}$	10	2.903	$10\bar{2}$
3	2.835	2.836	$1\bar{1}2$	30	2.833	$1\bar{1}2, 2\bar{2}1$
		2.831	$2\bar{1}1$			

Продолжение таблицы

Рентит				ReS ₂ , синт. (ASTM № 24-922)		
<i>I</i>	<i>d</i> _{изм.} , Å	<i>d</i> _{выч.} , Å	<i>hkl</i>	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>hkl</i>
10	2.7834	2.785	2 0 0	95	2.785	2 0 0
10	2.764	2.764	0 2 $\bar{1}$	95	2.764	0 2 $\bar{1}$
10	2.733	2.735	2 $\bar{2}$ 0	95	2.731	2 $\bar{2}$ 0
5	2.723	2.726	2 0 $\bar{1}$	10	2.719	2 0 $\bar{1}$
6	2.646	2.649	0 2 0			
8	2.642	2.640	2 $\bar{2}$ 1	80	2.641	0 2 0, 2 $\bar{2}$ 1
1 ш	2.577	2.578	1 1 $\bar{2}$	20	2.578	1 1 $\bar{2}$
6	*2.528					
1	2.5027	2.506	1 1 1	10	2.499	1 1 1, 1 $\bar{2}$ 1
		2.493	1 $\bar{2}$ 1			
		2.487	1 0 2	10	2.483	1 0 2
8	2.404	2.401	0 2 $\bar{2}$	95	2.403	0 2 $\bar{2}$
9	2.371	2.375	2 0 1	100	2.370	2 0 1, 2 $\bar{2}$ 1
		2.370	2 $\bar{2}$ 1			
1	*2.333					
1 ш	2.269	2.268	2 0 $\bar{2}$	50	2.267	2 0 $\bar{2}$
1 ш	*2.2139					
2 ш	2.1999	2.196	2 $\bar{2}$ 2	30	2.198	2 $\bar{2}$ 2
1 ш	2.1912	2.192	0 2 1	30	2.188	0 2 1
2	2.1319	2.133	2 1 $\bar{1}$			
7	2.1271	2.126	1 2 1	70	2.122	1 2 $\bar{1}$
8	2.1035	2.104	3 $\bar{2}$ 0	80	2.102	3 $\bar{2}$ 0
9	2.0914	2.088	1 $\bar{3}$ 1	80	2.087	1 $\bar{3}$ 1
1 ш	2.0664	2.070	2 $\bar{3}$ 1	20	2.067	2 $\bar{3}$ 1, 2 1 0
		2.070	2 1 0			
2 ш	2.0260	2.029	2 $\bar{3}$ 0	70	2.027	2 $\bar{3}$ 0, 0 0 3
		2.027	0 0 3			
3 ш	2.0166	2.015	3 $\bar{2}$ 1	50	2.014	3 $\bar{2}$ 1
3 ш	2.0056	2.002	1 3 0	50	2.000	1 3 0
1	1.9885	1.988	1 2 $\bar{2}$	50	1.988	1 2 $\bar{2}$
2 ш	1.9632	1.963	3 $\bar{2}$ 1	60	1.961	3 $\bar{2}$ 1
1 ш	1.9529	1.953	3 1 1	30	1.949	3 1 1, 1 $\bar{3}$ 1
1 ш	1.9171	1.924	0 2 3	30	1.927	0 2 3
1	1.8797	1.891	2 0 2	30	1.885	2 0 2
9	1.8724	1.873	3 0 $\bar{1}$	80	1.870	3 0 $\bar{1}$
8	1.8559	1.857	3 0 0	80	1.853	3 0 0
	*1.8260					
4 д	1.8226	1.823	3 $\bar{3}$ 0	50	1.820	3 $\bar{3}$ 0, 3 $\bar{3}$ 1
1	1.8024	1.801	2 0 3	30	1.801	2 0 3
1	1.7888	1.788	0 3 $\bar{2}$	10	1.786	0 3 $\bar{2}$
0.5	1.7665	1.768	1 2 1	20	1.764	1 2 1, 0 3 0
		1.766	0 3 0			
0.5	1.7502	1.753	2 $\bar{2}$ 3	30	1.755	2 $\bar{2}$ 3
		1.746	0 2 2	20	1.744	0 2 2
2 ш	1.7305	1.730	3 0 $\bar{2}$	50	1.727	3 0 $\bar{2}$
1 ш	1.7075	1.693	3 0 1	30	1.689	3 0 1
		1.681	3 $\bar{3}$ 1	5	1.682	3 $\bar{3}$ 1
0.5	1.6726	1.673	3 $\bar{3}$ 2	5	1.672	3 $\bar{3}$ 2
9	1.6289	1.631	2 2 1	80	1.628	2 2 1
10 ш	1.6156	1.617	4 2 0	80	1.614	4 2 0

Рениит			ReS ₂ , синт. (ASTM № 24-922)			
<i>I</i>	<i>d</i> _{изм.} , Å	<i>d</i> _{выч.} , Å	<i>hkl</i>	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>hkl</i>
10 ш	1.5938	1.592	2 $\bar{4}$ 1	95	1.591	2 $\bar{4}$ 1
2 ш	1.5867	1.587	2 $\bar{2}$ $\bar{2}$	10	1.585	2 $\bar{2}$ $\bar{2}$
4 ш	1.5698	1.570	4 $\bar{2}$ 1	50	1.567	4 $\bar{2}$ 1
1 р	1.5613	1.564	2 $\bar{2}$ 0	5	1.561	2 $\bar{2}$ 0
6 ш	1.5527	1.555	4 $\bar{2}$ 1	70	1.551	4 $\bar{2}$ 1, 1 $\bar{3}$ $\bar{1}$
		1.553	1 $\bar{3}$ 1			
2	1.5449	1.543	2 $\bar{4}$ $\bar{2}$	50	1.543	2 $\bar{4}$ $\bar{2}$, 0 $\bar{2}$ $\bar{4}$
		1.542	0 $\bar{2}$ $\bar{4}$			
4	1.5358	1.537	2 $\bar{4}$ 0	50	1.536	2 $\bar{4}$ 0, 4 $\bar{3}$ 0
		1.537	4 $\bar{3}$ 0			
2	1.5296	1.530	1 $\bar{3}$ $\bar{2}$	5	1.528	1 $\bar{3}$ $\bar{2}$, 2 $\bar{2}$ $\bar{3}$
1	1.5209	1.520	00 $\bar{4}$	30	1.521	00 $\bar{4}$
1	1.5068	1.512	30 $\bar{3}$	20	1.511	30 $\bar{3}$
3 ош	1.4815	1.481	1 $\bar{3}$ 0	30	1.479	1 $\bar{3}$ 0
		1.471	30 $\bar{2}$	10	1.466	30 $\bar{2}$, 4 $\bar{3}$ $\bar{1}$
		1.466	4 $\bar{3}$ $\bar{1}$			
1 р	1.4535	1.449	20 $\bar{4}$	10	1.449	20 $\bar{4}$
		1.418	2 $\bar{2}$ $\bar{4}$	10	1.419	2 $\bar{2}$ $\bar{4}$
		1.412	0 $\bar{2}$ $\bar{3}$	10	1.411	0 $\bar{2}$ $\bar{3}$
3 ш	1.3880	1.387	04 $\bar{1}$	30	1.386	04 $\bar{1}$
5 ш	1.3780	1.377	4 $\bar{4}$ 1	50	1.377	4 $\bar{4}$ 1
		1.363	40 $\bar{2}$	20	1.36	40 $\bar{2}$

$$a = 6.470(5) \text{ \AA}$$

$$b = 6.368(5) \text{ \AA}$$

$$c = 6.401(7) \text{ \AA}$$

$$\alpha = 105.0(1)^\circ$$

$$\beta = 91.59(9)^\circ$$

$$\gamma = 118.90(6)^\circ$$

$$V = 219.4(3) \text{ \AA}^3$$

$$a = 6.455 \text{ \AA}$$

$$b = 6.362 \text{ \AA}$$

$$c = 6.401 \text{ \AA}$$

$$\alpha = 105.04^\circ$$

$$\beta = 91.60^\circ$$

$$\gamma = 118.97^\circ$$

$$V = 218.4 \text{ \AA}^3$$

Примечание. Условия анализа: камера Гинье, CuK α -излучение; пики: ш — широкие, ош — очень широкие, р — размытые, д — двойные; * — рефлексы волластонита.

пирическая формула, рассчитанная на 3 атома, имеет вид Re_{1.002}Mo_{0.005}Si_{1.993}, что отвечает теоретической формуле ReS₂.

Структурная характеристика рениита. Согласно проведенному ранее изучению природного дисульфида рения из фумарол вулкана Кудрявый методом микродифракции электронов, его структура отлична от структур 2*H* и 3*R* политипных модификаций молибденита (Самотоин и др., 1995). На основании тех же данных указывалось, что природный дисульфид рения характеризуется триклинной сингонией слоистой структуры с параметрами элементарной ячейки, близкими к синтетической фазе ReS₂ (ASTM № 24-922, Wildervanck, Jellinek, 1971). Подчеркивалось, что от молибденита он отличается еще примерно в два раза большими параметрами *a* и *b*.

С данными микродифракции согласуются результаты рентгеновского изучения рениита, проведенного в настоящей работе в фокусирующей камере Гинье (CuK α -излучение, внутренний стандарт — Si). Значения межплоскостных расстояний и интенсивностей приведены в табл. 3 в сопоставлении с эталонными данными для синтетического триклинного дисульфида рения (ASTM № 24-922). Практически полная иден-

точность рентгенограмм позволила использовать для расчета параметров рениита индексы эталонной рентгенограммы синтетического ReS_2 . Параметры триклинной элементарной ячейки рениита: $a = 6.470$ (5) Å, $b = 6.368$ (5) Å, $c = 6.401$ (7) Å, $\alpha = 105.0$ (1)°, $\beta = 91.59$ (9)°, $\gamma = 118.90$ (6)°, $V = 219.4$ (3) Å³; $Z = 4$. Пр. группа $P1$. Соотношение параметров $a : b : c = 1.016 : 1 : 1.005$.

Обсуждение. Собственные минералы рения в природе чрезвычайно редки (Иванов и др., 1989). Наиболее известным природным соединением рения является джезказганит, сульфид рения, молибдена, меди и свинца, не имеющий, однако, четкой структурной характеристики и не утвержденный Комиссией по новым минералам и названиям ММА. В работе А. Д. Генкина с соавторами (1994) для него предложена формула $\text{ReMoCu}_2\text{PbS}_8$. Сообщалось о включении самородного рения в вольфрамиты Забайкалья (Рафальсон, Сорокин, 1976). Недавно описан таркианит — $(\text{Cu,Fe})(\text{Re,Mo})_4\text{S}_8$ с 53.61 мас. % рения, обнаруженный в концентрате из месторождения Хитра в Финляндии (Kojonen e. a., 2004).

Неоднократно отмечалась высокая рениеносность фумарольных молибденитов в активных вулканах: Мерапи (Индонезия) — до 11 мас. %, Момотомбо (Никарагуа) — до 6.5 мас. %, Сент-Хеленс (США) — до 3.7 мас. % (Bernard e. a., 1990). Молибденит, обильно проявленный на других фумарольных полях вулкана Кудрявый при температурах 600—800 °С, также содержит в заметных количествах примесь рения. Это, наряду со внешним сходством рениита и молибденита, позволяло предполагать существование изоморфного ряда между этими минералами, что подразумевало гексагональную симметрию рениита. Однако установленная в настоящей работе триклинная сингония рениита, согласующаяся с известной оптической двуосностью синтетического ReS_2 (Friemelt e. a., 1993), свидетельствует против этого предположения. Минералы несколько различаются и по физическим свойствам: кристаллы рениита полупрозрачны, упруги и хрупки в отличие от чрезвычайно мягких, неупругих и непрозрачных кристаллов молибденита.

Интересна причина появления дисульфида рения при субкларковых концентрациях рения (0.1—1 ppb, максимум — 10 ppb) в конденсатах газов вулкана Кудрявый. Среди факторов образования рениита в этом случае важную роль может играть наличие в основании рениитсодержащих пород ангидритовой толщи или какого-либо иного барьера, понижающего летучесть соединений молибдена и способствующего разделению молибдена и рения. Наиболее вероятным механизмом минералообразования в фумаролах служат газотранспортные реакции, при которых концентрация в газе вещества-переносчика металла ничтожно мала, а основным фактором, контролирующим образование твердой фазы, является градиент температуры. Именно этот механизм чаще других используется при синтезе кристаллов дисульфида рения.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Н. Н. Мозговой за всестороннюю помощь и обсуждение результатов.

Список литературы

- Генкин А. Д., Поплаво Е. М., Горшков А. И., Целин А. И., Сивцов А. В. Новые данные о джезказганите — сульфиде рения, молибдена, меди, свинца из месторождения Джезказган (Казахстан) // Геол. рудных месторожд. 1994. Т. 36. № 6. С. 536—544.
- Горшков Г. С. Вулканизм Курильской дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
- Ермаков В. А., Знаменский В. С., Штейнберг Г. С. Петрология вулкана кальдеры Медвежья (Курильские острова) // Изв. РАН. Сер. Геол. 2001. № 6. С. 97—118.
- Иванов В. В., Юшко-Захарова О. Е., Борисенко Л. Ф., Овчинников Л. Н. Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным редким металлам. М.: Недра, 1989. 462 с.
- Рафальсон М. Б., Сорокин Н. Д. Определение самородного рения в вольфрамитовых месторождениях методом локального рентгеноспектрального анализа. Вопросы геохимии. Иркутск, 1976. Т. 1. С. 65—66.
- Самотин Н. Д., Магазина Л. О., Знаменский В. С. Структурно-морфологические характеристики природного дисульфида рения из фумарол вулкана Кудрявый, о. Итуруп, Курильские острова // Докл. РАН. 1995. Т. 345. № 4. С. 518—522.

- Чалыгин И. В., Мозгова Н. Н., Брызгалов И. А., Мохов А. В. Кадмоиндит, CdIn_2S_4 — новый минерал из фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // ЗВМО. 2004. № 4. С. 21—27.
- Bernard A., Dumortier P. Identification of natural rhenium sulfide (ReS_2) in volcanic fumaroles from Usu volcano, Hokkaido, Japan // Proc. XI Int. Cong. on Electron Microscopy. Kyoto, 1986. P. 1691—1693.
- Bernard A., Symonds R. B., Rose W. J. Volatile transport and deposition of Mo, W and Re in high temperature magmatic fluids // Appl. Geochem. 1990. Vol. 5. P. 317—326.
- Friemelt K., Lux-Steiner M.-Ch., Bucher E. Optical properties of the layered transition-metal-dichalcogenide ReS_2 : Anisotropy in the Van der Waals plane // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. N 8. P. 5266—5268.
- Kojonen K. K., Roberts A. C., Isomäki O. P., Knauf V. V., Johanson B., Pakkanen L. Tarkianite, $(\text{Cu,Fe})(\text{Re,Mo})_4\text{S}_8$, a new mineral species from the Hitura mine, Nivala, Finland // Canad. Miner. 2004. Vol. 42. P. 539—544.
- Korzinsky M. A., Tkachenko S. I., Shmulovich K. I., Taran Yu. A., Shteinberg G. S. Discovery of a pure rhenium mineral at Kudriavy volcano // Nature. 1994. Vol. 369. P. 51—52.
- Wildervanck J. C., Jellinek F. The dichalcogenides of technetium and rhenium // J. Less-common Metals. 1971. Vol. 24. P. 73—81.
- Znamenskii V. S., Yakushev A. I. Das erste Rhenium-Mineral vom Vulkan Kudriavy, Kurilen // Lapis. 2000. Jg. 25. Nr 1. P. 21.

Поступила в редакцию
26 апреля 2005 г.

УДК 549.6

ЗРМО, № 5, 2005 г.
Zapiski RMO, N 5, 2005

© Почетный член А. П. ХОМЯКОВ,* д. чл. Ю. П. МЕНЬШИКОВ,**
почетный член Дж. ФЕРРАРИС,*** П. НЕМЕТ,**** д. чл. Г. Н. НЕЧЕЛЮСТОВ*****

БЫКОВАИТ, $\text{BaNa}\{(\text{Na,Ti})_4[(\text{Ti,Nb})_2(\text{OH},\text{O})_3\text{Si}_4\text{O}_{14}](\text{OH},\text{F})_2\} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ — НОВЫЙ ГЕТЕРОФИЛЛОСИЛИКАТ ИЗ ЛОВОЗЕРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ¹

A. P. KHOMYAKOV, Yu. P. MENSNIKOV, G. FERRARIS, P. NEMET, G. N. NECHELYUSTOV.
BYKOVAITE, $\text{BaNa}\{(\text{Na,Ti})_4[(\text{Ti,Nb})_2(\text{OH},\text{O})_3\text{Si}_4\text{O}_{14}](\text{OH},\text{F})_2\} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ — THE NEW
HETEROPHYLLOSILICATE FROM LOVOZERO ALKALINE MASSIF
(KOLA PENINSULA, RUSSIA)

* Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов,
121357, Москва, ул. Версаева, 15

** Геологический институт Кольского научного центра РАН, 184200, Апатиты, ул. Ферсмана, 14
*** Туринский университет, I-10125, Турин

**** Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья,
109017, Москва, Старомонетный пер., 31

New mineral bykovaite, a product of hydrothermal alteration of bornemanite, was found in hypercraffitite pegmatite «Shkatulka» at Mount Alluaiv, Lovozero alkaline massif (Kola Peninsula, Russia) occurring in association with ussingite, bornemanite, vuonnemite, shkatulkalite, lomonosovite, steenstrupine-(Ce), belovite-(Ce), sphalerite, etc. It occurs as compact spherulites, up to 3—5 mm in diameter, and spherical aggregates of tiny (0.005—0.05 mm) fibers radiating along [010] from a common center. The mineral is creamy with white streak and silky luster. Semitransparent. Brittle, cleavage is perfect on {001} and good on {100}. Mohs' hardness 3. Density measured — 2.98, calculated — 2.72 g/cm³. Slowly decomposed by 10 % HCl and HNO₃. Optically biaxial positive, $N_p = 1.668$, $N_m = 1.679$, $N_g = 1.710$, $2V(\text{meas.}) = 63(5)^\circ$, $2V(\text{calc.}) = 63^\circ$. Thermal data and IR spectrum are given. Chemical composition, by electron microprobe analysis (H_2O by TGA weigh loss), includes Na_2O 13.34, K_2O 0.67, CaO 0.20, SrO 0.66, BaO 13.22, FeO 0.28, MnO 2.22, Al_2O_3 0.15, SiO_2 29.05, TiO_2 , 18.93, Nb_2O_5 10.75, F 1.40, H_2O 10.00, $-\text{O} = \text{F}_2$ 0.59, total 100.28 wt %. The empirical formula based on $\text{Si} + \text{Al} = 4$ and in accordance with the modeled structure of the mineral is as following: $(\text{Ba}_{0.71}\text{Na}_{0.47}\text{K}_{0.12}\text{Sr}_{0.05})_{\Sigma 1.35}\{(\text{Na}_{3.07}\text{Ti}_{0.61}\text{Mn}_{0.26}\text{Ca}_{0.03}\text{Fe}_{0.03})_{\Sigma 4.00}[(\text{Ti}_{1.34}\text{Nb}_{0.66})_{\Sigma 2.00}((\text{OH})_{2.42}\text{O}_{0.58})_{\Sigma 3.00}(\text{Si}_{3.98}\text{Al}_{0.02})\text{O}_{14}]\}[(\text{OH})_{0.71}(\text{H}_2\text{O})_{0.68}$

¹ Рассмотрено Комиссией по новым минералам и названиям минералов Российского минералогического общества 14 августа 2003 г. Утверждено Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации 7 ноября 2003 г.