

## МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

### НАХОДКА СУЛЬФИДОВ РЕНИЯ В МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ РУДАХ ПРОЯВЛЕНИЯ МАЙКЕ (УЛЫТАУ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАЗАХСТАН)

© 2020 г. В. Л. Левин<sup>1, \*</sup>, В. Г. Степанец<sup>2, \*\*</sup>, Е. С. Ли<sup>3, \*\*\*</sup>,  
Г. К. Бекенова<sup>1, \*</sup>, М. С. Хакимжанов<sup>4, \*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ТОО “Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева”,  
ул. Кабанбай батыра, 69, Алма-Ата, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Astra Mining Kazakhstan, 207 Regent, London, UK

<sup>4</sup>SRK Consulting (Kazakhstan) Ltd, ул. Гоголя, 39, Алма-Ата, Республика Казахстан

<sup>3</sup>КапГТУ, пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Республика Казахстан

\*e-mail: levin\_v@inbox.ru, bekenova@mail.ru

\*\*e-mail: wladimir@stepanez.de

\*\*\*e-mail: li\_elen.kstu@mail.ru

\*\*\*\*e-mail: mkhakimzhanov@srk.kz

Поступила в редакцию 03.07.2019 г.

После доработки 21.07.2020 г.

Принята к публикации 21.08.2020 г.

При изучении минералогии медноколчеданных руд проявления Майке в районе Северного Улытау нами были впервые для данного района обнаружены микровключения сульфидов, содержащих в разных пропорциях рений, молибден, медь, свинец и висмут. Микровключения различаются формой выделения и химическим составом. На данном этапе исследования выделено 8 сульфидов, дающих при микрозондовом определении рений до 49.46 мас. %, железо, медь, молибден, свинец, висмут. Обнаруженные сульфиды имеют следующие кристаллохимические формулы:  $(\text{Re, Mo, Cu} \pm \text{Fe, Pt})_2\text{S}_3$ ,  $(\text{Re, Mo})\text{S}_2$ ,  $\text{ReS}_3$ ,  $\text{Re}_2\text{S}_7$ ,  $(\text{Pb, Re, Zn})\text{S}_2$ ,  $(\text{Pb, Re, Fe})\text{S}_2$ ,  $(\text{Pb, Re, Fe})_2\text{S}_3$ ,  $(\text{Re, Fe})(\text{Pb, Bi})\text{S}_3$ . Впервые обнаружена ранее не упомянутая в литературе фаза  $\text{Pb-Re-Zn-S}$ , установлено совместное нахождение Rh и Sb в минеральной фазе  $\text{Re-Fe-Pb-Bi-S}$  и выявлены соединения трисульфида  $\text{ReS}_3$  и семисульфида рения  $\text{Re}_2\text{S}_7$ .

*Ключевые слова:* Казахстан, Северный Улытау, медноколчеданные руды, минеральные фазы рения, свинца, меди, молибдена и висмута

DOI: 10.31857/S0869605520050044

### ВВЕДЕНИЕ

Рений является одним из редчайших элементов земной коры и в самородной форме был встречен только трижды. Первое упоминание о находке микронных включений металлического рения в вольфрамитовых метасоматизированных гранитоидов одного из редкометальных месторождений Забайкалья принадлежит М.Б. Рафальсону и Н.Д. Сорокину (1976).

Спустя несколько десятилетий А.Ф. Грачевым с соавторами (2008) был описан самородный рений в переходном слое глины на границе мела и палеогена в разрезе Гамс, Восточных Альп (Австрия). Природа самородного рения, обнаруженного в металлоносных глинах, авторами увязывается с эпохой максимальной активности мантийного плюма.

Годом ранее были опубликованы статьи о находках самородного рения в сульфосоле Капитановского ультрабазитового массива Среднего Побужья Украинского щита (Бобров и др., 2007; Гурський и др., 2007).

Этими тремя находками исчерпывается информация о самородном рении в континентальной коре Земли.

Минералы рения в земной коре также редки. На сегодня известны пять сульфидов. Джеккаганит ( $\text{ReMoCu}_2\text{PbS}_6$ ), обнаруженный в медистых песчаниках одноименного месторождения (Косяк, 1968; Поплавко и др., 1977), является наиболее известным минералом рения (Генкин и др., 1994). Рениит — дисульфид рения ( $\text{ReS}_2$ ) с 74.30 мас. % Re (Знаменский и др., 2005), описанный как новый минерал на рениевом fumarолевом поле вулкана Кудрявый, Медвежья Кальдера, Курилы (Россия), неоднократно упоминался исследователями (Korzinsky et al., 1994; Самотоин и др., 1995; Znamenskiy, Yakushev, 2000). Однако впервые природный дисульфид рения был установлен на вулкане Усу (Япония) (Bernard, Dumortier, 1986). Таркианит  $(\text{Cu,Fe})(\text{Re,Mo})_4\text{S}_8$  с 53.61 мас. % Re обнаружен в медно-никелевом концентрате месторождения Хиттура (Финляндия) (Kojonen et al., 2004). Также известен “джеккаганит” — сульфид железа, меди и рения (с содержанием 10.50–36.47% Re) в медно-молибден-порфиновых рудах месторождения Кальмакыр (Узбекистан) (Турсебеков и др., 2007). Следует отметить, что в настоящее время минерал “джеккаганит” дискредитирован Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации. Это обусловлено тем, что первоначально первооткрыватели (Поплавко и др., 1977) не представили никаких структурных данных для этого минерала (хотя в то время этого и не требовалось), а данных, полученных Генкиным и др. (1994), оказалось недостаточно для реабилитации минерала. Os—Cu рениит (<60.25 мас. % Re) описан в медносulfидных рудах в составе кварцито-песчаников месторождения Воронов Бор, Карелия (Лавров, Кулешевич, 2010).

Небольшую группу составляют минеральные фазы сульфидов рения и Mo—Cu—Fe—Ni, имеющих в основном научный интерес, в магматических месторождениях медно-никелевых руд, в мафит-ультрамафитовых комплексах Швеции (Ekström, Hålenius, 1982), Канады (Mitchell et al., 1989), Монтаны (Tarkian et al., 1991), Карелии (Barkov, Lednev, 1993) и Финляндии (Kojonen et al., 2004; Peltonen et al., 1995). Особо следует отметить присутствие фазы Re—Fe—Pb—Bi в медно-никелевых рудах группы Крейтон, Садбери (Канада) (Dare et al., 2010), которая ранее упоминалась в составе богатых пиротином сульфидов массива Талнотри на ЮЗ Шотландии (Power et al., 2004).

Одной из характерных особенностей самородного рения и его сульфидов является формирование в различных термодинамических и геодинамических условиях, на что указывает широкий интервал содержаний теллура и висмута в составе рениевых минералов (Кулешевич и др., 2009).

Оценка рениеносности территории Казахстана была дана в фундаментальной работе Э.Е. Файна (1996). В ней приведена информация о повышенном содержании рения во всех типах вкрапленных сульфидных руд Центрального Казахстана.

При изучении минералогии проявления Майке нами впервые обнаружены микровключения таблитчатой формы сульфида Re—Mo—Cu, дисульфида Re—Mo и сульфида Re с формулой  $\text{ReS}_3$  при содержании Re в анализах от 23.26 до 49.46 мас. %. Сульфид Re—Mo—Cu—Fe встречен только в пирите, а дисульфид и трисульфид встречаются исключительно в халькопирите.

Другая группа представлена микрокристаллами, имеющими на поверхности аншлифа игольчатую, перевидную и пластинчатую формы, сульфидов Fe—Pb—Re и Pb—Fe—Re—Bi, в которых концентрация Re изменяется от 6.53 до 15.21 мас. %. Это третья находка в мире рениевых фаз, где Re находится вместе с Pb, Fe или с Pb, Bi, Fe.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Рудопоявление Майке располагается в пределах Маятасского рудного района к северо-востоку от поселка Маятас в бассейне одноименной реки, впадающей в реку Кара-Тургай Северного Улытау.

Литогеохимическая аномалия в пределах контура рудопоявления Майке имеет субмеридиональное простирание и протяженность до 4.0 км при ширине от 20 до 400 м. Минерализованная зона на глубине 120 м выклинивается, ее мощность на поверхности составляет 30 м, при субмеридиональном простирании она круто ( $70-80^\circ$ ) погружается на восток. Зона минерализации с медноколчеданными рудами мощностью не более 35 см приурочена к выходам графит-кварц-рутил-сидерит-мусковит-хлоритовых сланцев, которые являются составной частью графит-кварц-мусковит-полевошпат-хлоритовой толщи (Stepanets et al., 2019), исторически выделяемой в раннепротерозойскую аралбайскую серию (Вишневецкая, Трусов, 1967). К выходам пород аралбайской серии пространственно и генетически приурочены зоны минерализации линейно-трещинного типа. Сульфидные медно-цинк-свинцовые руды с платиноидами и редкоземельными элементами и свинцовые руды с редкоземельными элементами тяготеют к выходам углеродисто-карбонатных сланцев, а медноколчеданные руды с платиноидами и редкоземельными элементами обнаружены в разрезе кварц-рутил-сидеритовых сланцев. Геохимическая специализация, как и природа углеродистого материала, не исключают отнесение этих пород к карбонатитам (Stepanets et al., 2019).

Данный вывод вполне согласуется с присутствием фуллерена и алмаза в графит-мусковит-полевошпат-кварцевых сланцах Северного Улытау (Чудин и Воинов, 2003). По данным С.С. Чудина содержание графита в этих сланцах достигает 4.12%, причем большая часть графита наблюдается в виде тонких чешуек размером менее 1.0 мм с температурой выгорания  $900^\circ\text{C}$  (Чудин и Воинов, 2013). В углеродсодержащих сланцах также установлены незначительные концентрации платины и палладия.

## МИНЕРАЛОГИЯ РУД

Руды проявления Майке на 95% представлены халькопиритом, реже присутствуют виоларит ( $\text{FeNi}_2\text{S}_4$ ), вавринит ( $\text{Ni}_2\text{SbTe}_2$ ), пентландит ( $\text{Fe}_4\text{Ni}_4(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni})\text{S}_8$ ), пирит ( $\text{FeS}_2$ ), пирротин ( $\text{FeS}$ ), сфалерит ( $\text{Zn}, \text{Fe})\text{S}$ , галенит ( $\text{PbS}$ ). В халькопирите обнаружены: сперрилит ( $\text{PtAs}_2$ ), тестибиопалладит ( $\text{Pd}(\text{Sb}, \text{Bi})\text{Te}$ ), гессит ( $\text{Ag}_2\text{Te}$ ) и идиоморфные включения минералов кобальтин-герсдорфитового ряда, обогащенные рассеянными платиноидами Pt, Ir, Rh, Ru, Os с разным их соотношением. Вавринит, напротив, содержит только Pd, а в виоларите встречены включения гессита. Обнаружено несколько зерен акантита ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), встречается теллурид свинца алтаит ( $\text{PbTe}$ ), также выявлены фосфаты и фторфосфаты, содержащие редкоземельные элементы цериевой подгруппы (La, Ce, Pr, Nd, Sm) и Y, крайне редко встречается молибденит (Stepanets et al., 2019).

В составе кор выветривания в кварц-рутил-сидерит-хлоритовых, сидерит-мусковит-хлоритовых сланцах, наряду с апатитом, титанитом, ильменитом, цирконом, встречаются желваки черчита. Неодимовая разновидность черчита является основным источником иттрия, европия и тяжелых лантаноидов (Нсанов, 1993).

Как показали ранее проведенные минералогические исследования (Stepanets et al., 2019), формирование руд проявления Майке происходило под воздействием магматических и постмагматических процессов минералообразования в несколько этапов.

На первом этапе формировались собственно медноколчеданные руды, с которыми ассоциируют сульфоарсениды никеля и кобальта, содержащие минералы Pt, Ir, Rh, Ru и Os, арсенид платины, антимонит теллура. Основная масса микровключений сульфидов рения ассоциирует с халькопиритом и крайне редко с пиритом. В ассоциации с

сульфоарсенидами никеля и кобальта крайне редко встречается ульманнит. Для него свойственен широкий спектр элементов-примесей: Ag, Pd, Te, Bi, что характерно для минеральных ассоциаций гидротермальных месторождений. На этом этапе на медноколчеданные руды накладывается полиметаллическая минерализация. Появление сфалерита, как правило, сопровождается образованием акантита и самородного серебра. Наиболее поздними являются фосфаты и фторфосфаты РЗЭ.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Минералогия проявления Майке нами была изучена по образцам керна скважины П-10, любезно предоставленных компанией “Маятас”.

Минералы медноколчеданных руд были идентифицированы в аншлифах, изготовленных из керна скважины, в лаборатории минералогии ТОО ИГН им. К.И. Сатпаева (Алма-Ата) с помощью энергодисперсионного спектрометра INCA ENERGY, фирмы OXFORD INSTRUMENTS (Англия) (ускоряющее напряжение 25 кВ, ток зонда 25 нА, диаметр зонда 1–2 мкм), установленного на электронно-зондовом микроанализаторе SUPERPROBE 733, фирмы JEOL (Япония). Образцы сравнения и аналитические линии для соответствующих элементов: Cu, Fe, S (CuFeS<sub>2</sub>, Cu K, Fe K, S K); Pb (PbS, Pb L); Mo (MoS<sub>2</sub>, Mo L), Re (Re M), Ni (Ni K), Zn (Zn K), Rh (Rh L), Sb (Sb L), Bi (Bi L), Sn (Sn L).

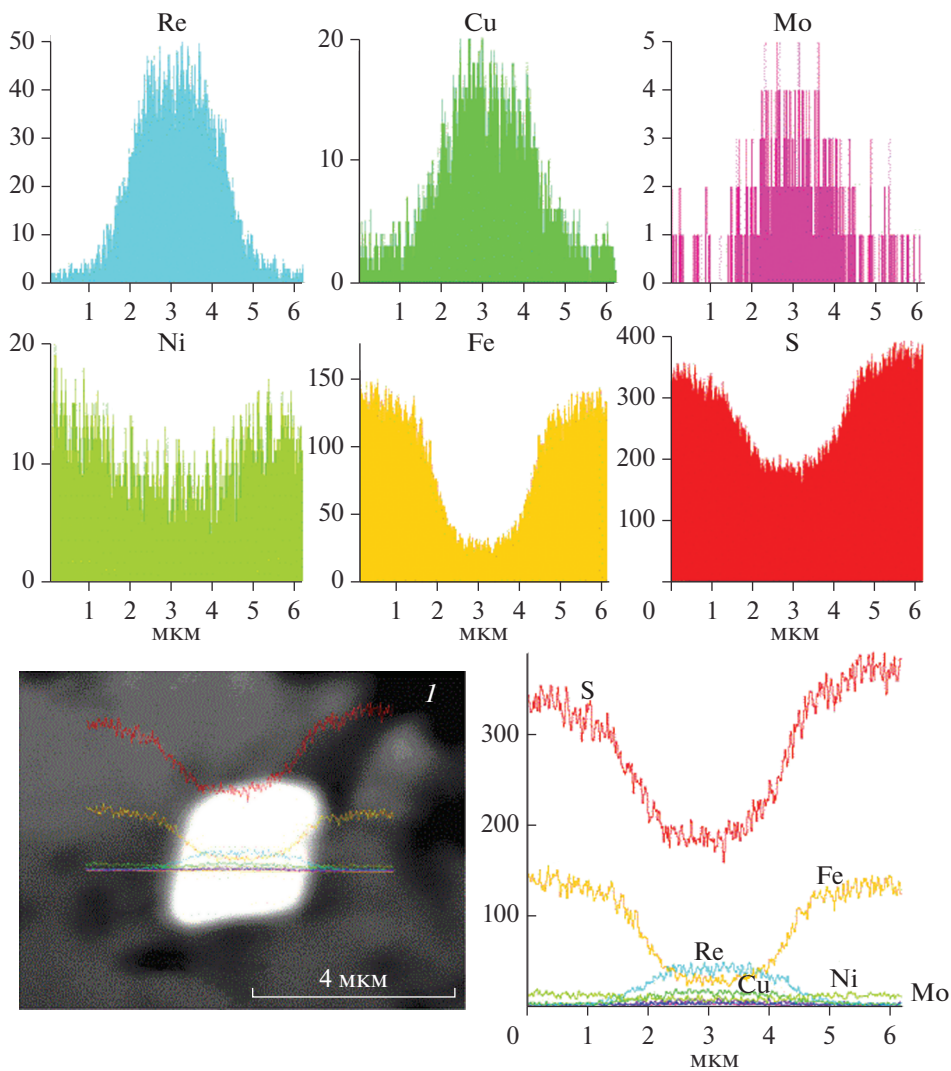
Аншлифы просматривали в электронно-зондовом микроанализаторе в режиме обратно-рассеянных электронов (состав) (BEI-compo). Конструктивно детектор BE в SUPERPROBE 733 состоит из двух половин кольца. При суммировании сигналов от каждой половины контраст в BE возрастает и позволяет различать две фазы, отличающиеся друг от друга по среднему атомному номеру на единицу. Поэтому очень мелкие зерна, содержащие тяжелые элементы, в указанном режиме хорошо заметны даже при увеличении  $\times 500$ .

Атомно-эмиссионный полуколичественный спектральный анализ был выполнен в лаборатории физических и химических методов исследований на дифракционном спектрографе ДФС-13 с дифракционной решеткой 500 штрихов на мм (аналитик Т.А. Озерова). Обратная линейная дисперсия прибора составляла 0.4 нм/мм, разрешающая сила спектрографа близка к теоретическому значению и составляла 720000. В качестве источника возбуждения спектров использовалась дуга электрического тока силой 14 А. Спектры фотографировались на фотопластинки ПФС-03 в ультрафиолетовой области. Для исследования были использованы сколки, образовавшиеся при изготовлении аншлифа.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

При изучении минерального состава руд проявления Майке нами впервые для рудного района Маятас Северного Улытау обнаружены микровключения сульфидов, содержащих в разных пропорциях рений, молибден, медь, свинец и висмут.

На рис. 1 приведены данные, полученные при сканировании по горизонтальной линии микровключения сульфида Re–Cu–Mo–Fe. Сопоставление концентрационных кривых для отдельных элементов позволяет установить корреляционную связь между ними, в данном случае прямую для Re, Cu, Mo и обратную для этих элементов с Fe и Ni. Прямая корреляция для Ni, Fe, S указывает на состав Ni-пиритовой матрицы, в которой находится сульфид Re–Cu–Mo–Fe. Провал в кривой для S имеет место из-за того, что концентрация серы во включении ниже, чем в пирите. На рис. 2 приведен энергодисперсионный спектр от зерна сульфида Re–Pb–Bi. На спектре видны сильные линии Fe, Cu и S от халькопиритовой матрицы и слабые от небольших примесей Sb и Zn.



**Рис. 1.** Распределение элементов по горизонтальной линии сканирования через Re-содержащее зерно, находящееся в пирите. ВЕИ-компо сульфида Re–Mo–Cu. Цветными линиями показано распределение отдельных элементов. Провал в распределении по S очевидно обусловлен тем, что серы в зерне относительно меньше, чем в пиритовой матрице, что подтверждает нахождение зерна в пирите.

**Fig. 1.** Distribution of elements along the horizontal scanning line of Re-bearing grain (Re–Cu–Mo–S) in pyrite and partially in contact with chalcopyrite. BEI-compo of Re–Mo–Cu sulfide. Colored lines show the distribution of elements.

Микровключения сульфидов различаются по химическому составу (табл. 1–6, рис. 3–6). Содержание рения в сульфидах варьирует в довольно широких пределах (от 1.04 до 49.46 мас. %). Практически все микровключения были обнаружены в халькопирите и только одно – в пирите. Всего было обнаружено 27 микровключений и выполнено

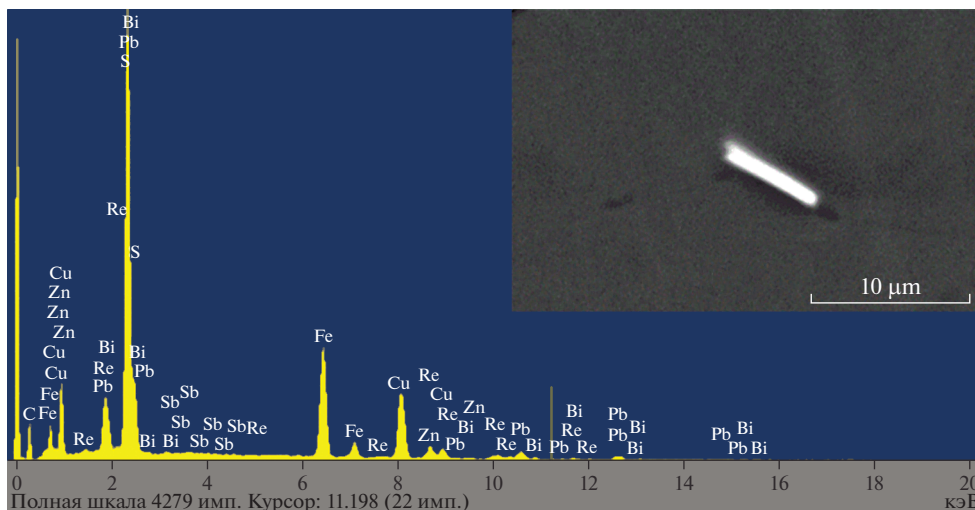


Рис. 2. Энергодисперсионный спектр зерна сульфида Re–Pb–Bi. На врезке BEI-компо этого зерна.

Fig. 2. Energy dispersive spectrum of a grain of Re–Pb–Bi sulfide. On the inset BEI-compo of the grain

32 микрозондовых анализа, из них пять получены при сканировании луча по выбранной линии для записи концентрационных кривых отдельных элементов. Все зерна по форме можно разделить на две группы. Первые имеют в срезе аншлифа ромбическую, треугольную, четырех и пятиугольную формы, а вторые, как правило, имеют коромыслообразную и игольчатую форму, являясь, по-видимому, тонкими пластинками. Изученные нами микровключения сульфидов рения имеют только минералогическое значение из-за крайне низкой концентрации (<0.0005%) Re в медноколчеданной руде (по данным атомно-эмиссионного полуколичественного спектрального анализа).

Из-за малого размера микровключений рениевых минералов, даже при анализе “в точке”, свой вклад в анализ всегда давали элементы матрицы (как правило –халькопирита), что необходимо учитывать при пересчете химических формул. В качестве примера можно привести анализ второго зерна из табл. 4. Исходя из того, что исследуемое зерно находится в халькопирите, и, зная уровень концентрации Cu и Fe в последнем (Бетехтин, 1950), определяем коэффициент  $K (Cu/Fe) = 1.14$ . В нашем конкретном случае содержание 7.93 мас. % Cu больше, чем 3.68 мас. % Fe, следовательно, нам необходимо узнать, сколько меди и серы останется для образования формулы сульфида Re–Mo–Cu. Для этого умножаем содержание железа на коэффициент  $K$ :  $3.68\%Fe \times 1.14 = 4.20\%Cu$ . Если есть избыток железа, то его количество, необходимое для халькопирита, определяем по формуле  $Cu/1.14 = Fe$ . Исходя из этих данных, вычисляем, сколько серы пойдет на образование халькопирита (Булах, 1964). Получается 4.24 мас. % S. Это число вычитаем из общего количества серы и получаем то количество серы, которая участвует в формуле искомого сульфида Re–Mo–Cu. Химический состав сульфида Re–Mo–Cu (мас. %): 22.22 S, 3.3 Fe, 4.2 Cu, 12.6 Mo, 49.4 Re. Приводим их сумму к 100%. Из полученных данных (табл. 1, анализ зерна 2) рассчитываем формулу сульфида Re–Mo–Cu. По такому принципу были рассчитаны формулы, приведенные в табл. 1–3. Близость формульных коэффициентов к целочисленным значениям указывает на приемлемость использованного метода.

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) микровключений сульфидов рения, молибдена и меди  
**Table 1.** The chemical composition (wt %) of microinclusions of sulfides of rhenium, molybdenum and copper

Номер микровключения	S	Fe	Cu	Ni	Mo	Re
1С	29.27	7.76	4.67	2.72	10.32	45.26
2*	26.26	3.68	7.93	0.00	12.66	49.46
3	27.68	3.35	7.64	0.00	13.38	47.96
4*	28.02	5.41	9.58	0.00	10.93	46.06
5*	30.59	10.56	12.63	0.00	9.25	36.97
6*	29.48	9.73	12.66	0.00	9.55	38.58
7*	29.63	9.71	12.63	0.00	9.53	38.50
8С	31.88	21.01	23.64	0.00	3.48	19.99
9*	35.11	12.68	15.77	0.00	0.00	36.44
10*	36.03	19.10	21.61	0.00	0.00	23.26
11*	34.39	17.94	20.36	0.00	0.00	27.32
12*	34.45	25.88	29.68	0.00	0.00	9.99
13*	34.28	28.33	32.19	0.00	0.00	5.20

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) микровключений рения, свинца и висмута  
**Table 2.** The chemical composition (wt %) of microinclusions of rhenium, lead and bismuth

Номер микровключения	S	Fe	Cu	Rh	Zn	Sb	Pb	Bi	Re
1*	30.75	22.30	24.09	0.00	0.00	0.00	10.61	3.32	8.93
2*	31.08	22.74	23.73	0.00	0.00	0.00	9.84	3.68	8.93
3*	31.61	23.20	24.71	0.00	0.00	0.00	8.31	3.61	8.56
1-3С	31.15	25.08	27.09	0.00	0.00	0.00	7.23	2.92	6.53
5*	29.22	20.24	21.58	0.00	0.47	0.46	12.92	3.93	11.19
6*	29.36	15.44	15.78	0.30	0.00	1.00	19.69	3.22	15.21
7*	30.10	23.89	26.17	0.00	0.00	0.00	9.66	3.19	6.98
8*	30.47	24.24	26.72	0.00	0.00	0.00	7.95	3.63	6.99

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изученные микровключения можно разделить на две группы: I группа представлена сульфидами  $\text{Re-Mo-Cu} \pm \text{Fe}$ ,  $\text{Re-Mo}$ ,  $\text{Re}$ , II группа –  $\text{Pb-Re-Fe}$ ,  $\text{Pb-Re}$  и  $\text{Re-Fe-Pb-Bi}$ .

**I группа.** В настоящий момент известны минералы рения: рениит ( $\text{ReS}_2$ ), сульфид рения ( $\text{ReS}$ ) и таркианит  $(\text{Cu, Fe, Ni, Co})(\text{Re, Mo, Os})_4\text{S}_8$ . Изученный нами сульфид  $\text{Re}(\text{Mo, Cu})\text{S}_3$  наиболее похож на минеральную фазу  $(\text{Re, Mo, Fe, Cu})_2\text{S}_3$  из комплекса Колдвелла, Онтарио (Mitchell et al., 1989), для которой электронно-зондовый микроанализ кристалла ( $7 \times 10$  мкм) дал (мас. %): 48.95 Re, 14.15 Mo, 4.75 Cu, 4.15 Fe, 26.85 S, сумма 98.85. Идеальная формула минерала имеет вид  $(\text{Re, Mo, Fe, Cu})_2\text{S}_3$  или  $\text{Re}(\text{Mo, Cu} \pm \text{Fe})\text{S}_3$ . Зерно аналогичного сульфида  $\text{Re-Fe-Mo-Cu-Os}$ , обнаруженное в пирротине рудного тела Гертруды, медно-никелевого месторождения Садбери (Dare et al., 2010), по мнению авторов, представляет собой таркианит (Kojonen et al., 2004). Сульфид

**Таблица 3.** Химический состав (мас. %) микровключений рения и свинца  
**Table 3.** The chemical composition (wt %) of rhenium and lead microinclusions

Номер микров- включения	S	Fe	Cu	Zn	Pb	Re
1*	33.83	26.12	28.58	0.00	6.38	5.09
2*	34.16	28.19	31.16	0.00	2.06	4.42
3*	33.03	27.43	31.09	0.00	4.96	3.48
4*	33.84	25.08	27.59	0.57	7.99	4.93
5*	34.40	28.92	32.83	0.12	2.69	1.04
6*	33.52	26.93	29.85	0.00	6.25	3.45
7*	32.30	22.98	24.04	0.00	8.84	11.71
8*	33.80	22.34	23.78	0.00	7.83	12.24
9*	32.35	23.01	24.07	0.00	8.85	11.73
10*	31.80	19.57	21.03	0.00	15.28	12.31
11*	32.32	21.85	23.81	0.00	11.73	10.30

Примечание: Все анализы приведены к 100%.

**Таблица 4.** Химический состав сульфидов, полученный после вычитания Fe, S и Fe, Cu, S в виде пирита и халькопирита  
**Table 4.** The chemical composition of sulfides obtained after subtracting Fe, S and Fe, Cu, S in the form of pyrite and chalcopyrite

Номер микров- включения	Сульфид	S	Fe	Cu	Mo	Re	Формула
1*	Re-Mo-Cu-Fe	25.35	2.29	5.21	13.28	53.86	$(\text{Re}_{1.08}\text{Mo}_{0.52}\text{Cu}_{0.31}\text{Fe}_{0.15})_{2.05}\text{S}_{2.95}$
2*	Re-Mo-Cu	25.01		4.77	14.04	56.18	$(\text{Re}_{1.16}\text{Mo}_{0.56}\text{Cu}_{0.26})_{2.01}\text{S}_{2.99}$
3*	Re-Mo-Cu	26.77		4.29	15.04	53.90	$(\text{Re}_{1.07}\text{Mo}_{0.58}\text{Cu}_{0.25})_{1.90}\text{S}_{3.10}$
4*	Re-Mo-Cu	27.51		3.75	13.18	55.55	$(\text{Re}_{1.1}\text{Mo}_{0.51}\text{Cu}_{0.22})_{1.83}\text{S}_{3.17}$
5*	Re-Mo	28,55			14.30	57.15	$(\text{Re}_{0.68}\text{Mo}_{0.33})_{1.02}\text{S}_{1.98}$
6*	Re-Mo	27.53			14.38	58.09	$(\text{Re}_{0.71}\text{Mo}_{0.34})_{1.05}\text{S}_{1.95}$
7*	Re-Mo	27.75			14.34	57.91	$(\text{Re}_{0.70}\text{Mo}_{0.34})_{1.04}\text{S}_{1.96}$
8*	Re-Mo	24.90			11.14	63.97	$(\text{Re}_{0.83}\text{Mo}_{0.28})_{1.12}\text{S}_{1.88}$
9*	Re-Cu	36.76		3.60		59.64	$(\text{Cu}_{0.15}\text{Re}_{0.84})_{0.99}\text{S}_{3.01}$
10*	Re	37.58	0.37			62.04	$(\text{Re}_{1.98}\text{Fe}_{0.04})_{2.02}\text{S}_{6.98}$
11*	Re	33.67	0.19			66.13	$(\text{Re}_{1.01}\text{Fe}_{0.01})_{1.02}\text{S}_{2.98}$
12*	Re	26.76				73,24.	$\text{Re}_{0.96}\text{S}_{2.04}$
13*	Re	24.64				75.36	$\text{Re}_{1.02}\text{S}_{1.97}$

Примечания: все анализы приведены к 100%.

фид Re–Mo–Cu–Os медно-никелевого месторождения Экойоки в Финляндии (Peltonen et al., 1995) не только составом (52.70% Re, 13.60% Mo, 5.82% Cu, 25.78% S), но и формой выделения, очень похож на изученный нами сульфид  $\text{Re}(\text{Mo,Cu})\text{S}_3$ .

На полученных срезах в аншлифе кристаллы сульфида  $\text{Re}(\text{Mo,Cu})\text{S}_3$  встречаются в виде параллелограммов чаще с углами, близкими к 70° и 110° (рис. 3), что существенно



**Таблица 5.** Химический состав (мас. %) сульфида Pb–Re–Bi, полученный после вычитания Fe, Cu, S в виде халькопирита (1–8), и минеральных фаз Pb–Re–Bi–S месторождения Садбери (Dare et al., 2010)

**Table 5.** The chemical composition (wt %) of Pb–Re–Bi sulfide is obtained after subtraction of Fe, Cu, S in the form of chalcopyrite (1–8) and the Pb–Re–Bi–S mineral phases from Sudbury deposit (Dare et al., 2010)

Номер микровключения	S	Fe	Rh	Zn	Sb	Pb	Bi	Re
1*	21.14	3.84	0.00	0.00	0.00	34.82	10.90	29.31
2*	22.63	6.20	0.00	0.00	0.00	31.24	11.68	28.35
3*	23.24	5.30	0.00	0.00	0.00	29.00	12.60	29.87
1–3с.	22.78	12.04	0.00	0.00	0.00	28.25	11.41	25.52
5*	20.19	3.64	0.00	0.47	0.46	35.72	9.50	30.96
6*	24.70	2.96	0.30	0.00	1.85	36.41	5.95	28.13
7*	15.30	3.79	0.00	0.00	0.00	39.41	13.02	28.48
8*	15.23	3.51	0.00	0.00	0.00	34.88	15.93	30.45
CR_9_1	21.8	5.5	0.00	0.00	0.00	38.7	9.8	25.2
CR_10_4b	22.7	7.7	0.00	0.00	0.00	34.9	10.1	25.4
CR_18_21	23.1	5.5	0.00	0.00	0.00	38.3	10.47	27.1

Кристаллохимические формулы:

1.  $(\text{Re}_{0.71}\text{Fe}_{0.31})_{1.02}(\text{Pb}_{0.76}\text{Bi}_{0.24})_{1.00}\text{S}_{2.98}$ ,
2.  $(\text{Re}_{0.65}\text{Fe}_{0.47})_{1.12}(\text{Pb}_{0.64}\text{Bi}_{0.24})_{0.88}\text{S}_{3.00}$ ,
3.  $(\text{Re}_{0.65}\text{Fe}_{0.40})_{1.05}(\text{Pb}_{0.60}\text{Bi}_{0.26})_{0.86}\text{S}_{3.09}$ ,
4.  $(\text{Re}_{0.55}\text{Fe}_{0.86})_{1.41}(\text{Pb}_{0.54}\text{Bi}_{0.22})_{0.76}\text{S}_{2.83}$ ,
5.  $(\text{Re}_{0.77}\text{Fe}_{0.30})_{1.07}(\text{Pb}_{0.80}\text{Bi}_{0.21})_{1.01}\text{S}_{2.92}$ ,
6.  $(\text{Re}_{0.38}\text{Fe}_{0.13}\text{Pb}_{0.44}\text{Bi}_{0.07}\text{Sb}_{0.04})_{1.06}\text{S}_{1.94}$ ,
7.  $(\text{Re}_{0.64}\text{Fe}_{0.29})_{0.93}(\text{Pb}_{0.80}\text{Bi}_{0.26})_{1.06}\text{S}_{2.01}$ ,
8.  $(\text{Re}_{0.69}\text{Fe}_{0.27})_{0.96}(\text{Pb}_{0.71}\text{Bi}_{0.32})_{1.03}\text{S}_{2.01}$ ,
- 9\_1.  $(\text{Re}_{0.59}\text{Fe}_{0.43})_{1.02}(\text{Pb}_{0.82}\text{Bi}_{0.20})_{1.02}\text{S}_{2.96}$ ,
- 10\_4b.  $(\text{Re}_{0.57}\text{Fe}_{0.57})_{1.14}(\text{Pb}_{0.70}\text{Bi}_{0.20})_{0.90}\text{S}_{2.95}$ ,
- 18\_21.  $(\text{Re}_{0.61}\text{Fe}_{0.41})_{1.02}(\text{Pb}_{0.78}\text{Bi}_{0.21})_{0.98}\text{S}_{3.00}$ .

отличает этот сульфид от аналогичных по составу минеральных фаз медно-никелевых месторождений, описанных в работе (Dare et al., 2010).

П. Пелтонен с соавторами (Peltonen et al., 1995) при расчете состава двух зерен учитывал влияние матрицы, а пересчет химического состава сульфида Re–Mo–Cu–Os на 5 атомов дал формулу  $\text{Re}_{1.04}(\text{Mo}_{0.54}\text{Cu}_{0.34}\text{Os}_{0.06})_{0.94}\text{S}_{3.02}$ , которая соответствует формулам из нашей табл. 4 (анализ микровключений 2–4) в упрощенном виде  $\text{Re}(\text{Mo}, \text{Cu})\text{S}_3$ .

Аналогичную формулу  $(\text{Re}_{0.90}\text{Fe}_{0.42}\text{Mo}_{0.39}\text{Cu}_{0.30}\text{Os}_{0.05})_{2.05}\text{S}_{2.95}$  имеет и сульфид, описанный на медно-никелевом месторождении Садбери (Dare et al., 2010). Если учесть несколько завышенное количество железа, то можно предположить, что в данном варианте не было учтено влияние пирротиновой матрицы. После исключения пирротина формула принимает следующий вид:  $\text{Re}_{1.08}(\text{Mo}_{0.47}\text{Cu}_{0.36}\text{Os}_{0.06})_{0.89}\text{S}_{3.03}$ .

По отношению к таркианиту  $(\text{Cu}, \text{Fe})(\text{Re}, \text{Mo})_4\text{S}_8$  изученный нами сульфид отличается крайне низким уровнем содержания Fe или его полным отсутствием. Отношение Re/Mo в таркианите более 4, что выше, чем в нашем случае. Если таркианит и его аналоги дают в срезе шестигранные и пятигранные пластинки (Barkov, Lednev, 1994; Kojonen et al., 2004), то срезы кристаллов нашей минеральной фазы  $\text{Re}(\text{Mo}, \text{Cu})\text{S}_3$  имеют форму ромба.

Только отсутствие возможности выполнить рентгеноструктурный анализ из-за крайне малых размеров изученных кристаллов не позволяет выделить нам эту мине-

**Таблица 6.** Химический состав (мас. %) минеральных фаз Re–Pb–Zn–S и Re–Pb–Fe–S, полученный после вычитания Fe, Cu, S в виде халькопирита

**Table 6.** The chemical composition (wt %) of the Re–Pb–Zn–S and Re–Pb–Fe–S mineral phases are obtained after subtraction Fe, Cu, S in the form of chalcopyrite

Номер микровключения	S	Fe	Zn	Sn	Pb	Re
1*	27.20	0.00	3.08	0.00	43.12	26.61
2*	23.15	0.00	2.40	0.00	53.69	20.76
3*	29.08	6.09	0.00	0.00	35.29	29.54
4*	27.68	8.47	0.00	0.00	20.30	43.55
5*	16.34	1.56	0.00	0.00	48.25	33.85
6*	26.02	1.86	0.00	0.00	46.47	25.65
7*	26.46	6.16	0.00	0.42	28.80	38.16
8*	33.08	4.66	0.00	0.00	24.68	38.58
9*	26.13	6.24	0.00	0.00	29.08	38.55
10*	27.06	2,85	0.00	0.00	38,82	31,28
11*	26.92	3.05	0.00	0.00	37.29	32.74

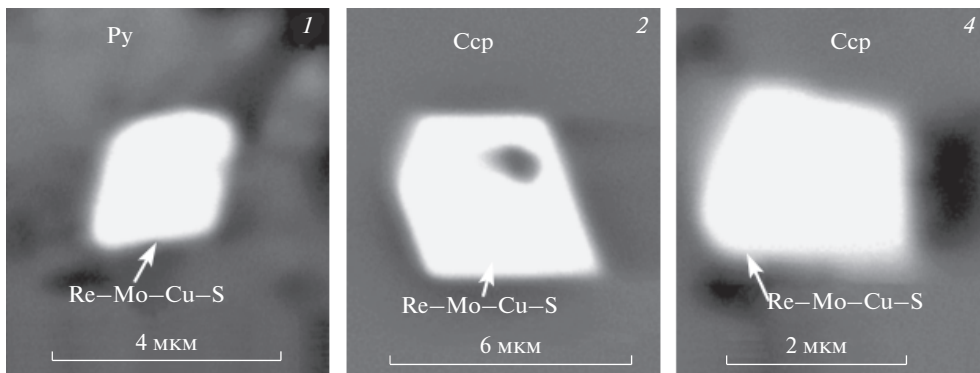
Кристаллохимические формулы:

1.  $(\text{Pb}_{0.50}\text{Re}_{0.34}\text{Zn}_{0.11})_{0.96}\text{S}_{2.04}$ ,
2.  $(\text{Pb}_{0.69}\text{Re}_{0.30}\text{Zn}_{0.1})_{1.08}\text{S}_{1.92}$ ,
3.  $(\text{Pb}_{0.38}\text{Re}_{0.35}\text{Fe}_{0.24})_{0.98}\text{S}_{2.02}$ ,
4.  $(\text{Re}_{0.52}\text{Fe}_{0.34}\text{Pb}_{0.22})_{1.07}\text{S}_{1.93}$ ,
6.  $(\text{Pb}_{0.56}\text{Re}_{0.34}\text{Fe}_{0.08})_{0.98}\text{S}_{2.02}$ ,
7.  $(\text{Re}_{0.48}\text{Pb}_{0.32}\text{Fe}_{0.26}\text{Sn}_{0.01})_{1.07}\text{S}_{1.93}$ ,
8.  $(\text{Re}_{0.50}\text{Pb}_{0.29}\text{Fe}_{0.20})_{1.00}\text{S}_{2.00}$ ,
9.  $(\text{Re}_{0.49}\text{Pb}_{0.33}\text{Fe}_{0.26})_{1.08}\text{S}_{1.92}$ ,
10.  $(\text{Pb}_{0.45}\text{Re}_{0.40}\text{Fe}_{0.12})_{0.97}\text{S}_{2.03}$ ,
11.  $(\text{Pb}_{0.43}\text{Re}_{0.42}\text{Fe}_{0.13})_{0.98}\text{S}_{2.02}$ .

ральную фазу в самостоятельный минерал  $\text{Re}(\text{Mo},\text{Cu} \pm \text{Fe})\text{S}_3$ . Это относится и к остальным встреченным нами фазам. Есть также вариант пересчета и на 15 атомов, тогда формула будет иметь вид:  $\text{Cu}(\text{Re},\text{Mo} \pm \text{Fe})_5\text{S}_9$ , что соответствует таковой, предложенной для сульфида рения медно-никелевого месторождения Экойоки в Финляндии (Peltonen et al., 1995).

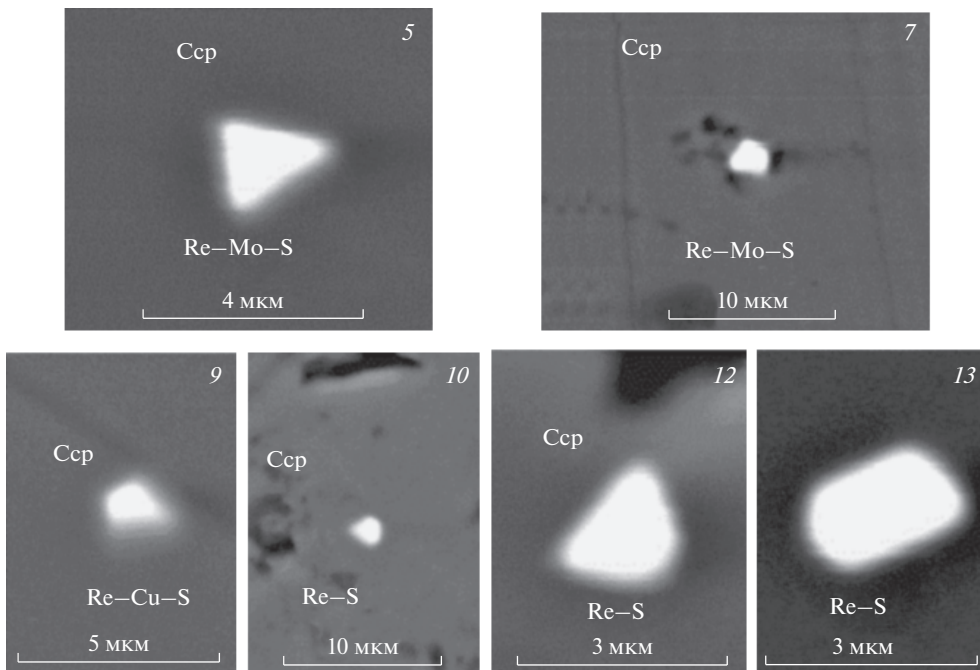
Следующую подгруппу образуют четыре микрозерна с формулой дисульфида  $(\text{Re},\text{Mo})\text{S}_2$  (табл. 4, анализ микровключений 5–8), которые представлены срезами треугольной и пятиугольной форм размером не более  $2.5 \times 3.0$  или  $2.0 \times 3.5$  мкм (рис. 4, микровключения 5, 7).

Аналогичные или близкие по составу кристаллы были ранее описаны как промежуточные фазы  $(\text{Mo},\text{Re})\text{S}_2$  и  $(\text{Re},\text{Mo})\text{S}_2$  с 10.5–38.5 мас. % Re в порфировой системе Пагони Рачи, Греция (Voudouris et al., 2009), а также промежуточные фазы между молибденитом и рениитом с 37.2–46.1 мас. % Re в порфировой системе Конос (Drábek et al., 2010). Это может быть связано с включением рениита в молибдените и наоборот, как было предложено в ранее опубликованной работе (Drábek et al., 2010), что также возможно при переслаивании этих двух минералов, имеющих одинаковую структуру. Содержание Re в сульфиде может сильно варьировать в пределах одного зерна. Следует отметить, что дисульфид Re–Mo существенно отличается от промежуточных фаз  $(\text{Mo},\text{Re})\text{S}_2$  и  $(\text{Re},\text{Mo})\text{S}_2$  тем, что в них отношение  $\text{Mo}/\text{Re} = 0.25$  остается почти постоянным, а в других оно равно 1. Отличаются эти два сульфида и формой выделения. Промежуточные фазы  $(\text{Mo},\text{Re})\text{S}_2$  и  $(\text{Re},\text{Mo})\text{S}_2$ , как правило, представлены тонкими игольчатыми кристаллами (Panagiotis et al., 2013). Не исключено, что авторы могли наблюдать срезы тонких гексагональных пластинок.



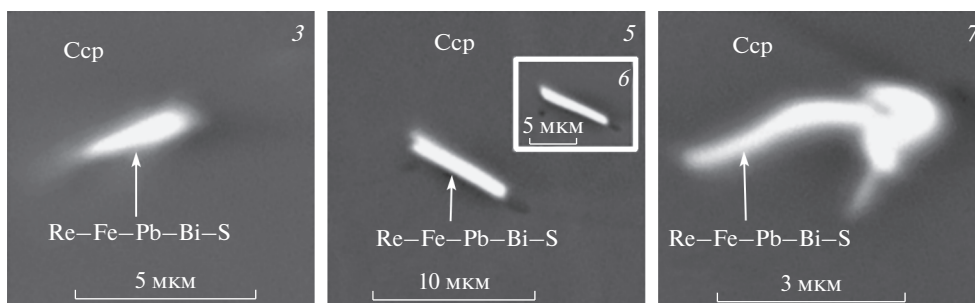
**Рис. 3.** Зерна сульфидов рения (сняты в режиме BEI-compo): 1 – слабо идиоморфный параллелограмм (ромб) сульфида  $\text{Re}(\text{Mo},\text{Cu},\text{Fe})\text{S}_3$ , 2 – идиоморфный параллелограмм (ромб) и 4 – слабо идиоморфное зерно сульфида  $\text{Re}(\text{Mo},\text{Cu})\text{S}_3$ . 1, 2, 4 – соответствуют номерам микровключений в табл. 4. Py – пирит, Ccp – халькопирит.

**Fig. 3.** BEI-compo images of the crystals of rhenium sulfides: 1 – slightly idiomorphic parallelogram (rhombus) of  $\text{Re}(\text{Mo},\text{Cu},\text{Fe})\text{S}_3$ , 2 – idiomorphic parallelogram (rhombus) and 4 – slightly idiomorphic grain of  $\text{Re}(\text{Mo},\text{Cu})\text{S}_3$ . 1, 2, 4 – correspond to the numbers of inclusions in Table 4. Py – pyrite, Ccp – chalcopyrite.



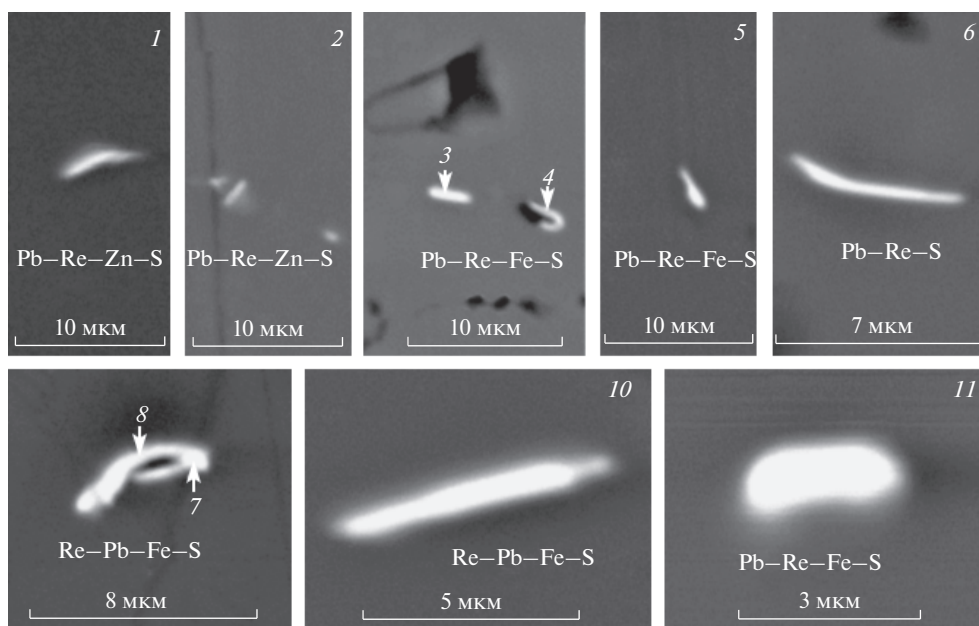
**Рис. 4.** Зерна сульфидов рения (сняты в режиме BEI-compo): дисульфид  $\text{Re-Mo}$  (табл. 4, анализы микровключений 5, 7), трисульфид  $\text{Re-Cu}$  (анализы 9, 10),  $\text{Re}$  (анализ 12) и рениит  $\text{ReS}_2$  (анализ 13).

**Fig. 4.** BEI-compo images of the crystals: ( $\text{Re-Mo}$ ) sulfides (Table 4, analyzes microinclusions 5–7), ( $\text{Re-Cu}$ ) sulfides (analyzes 9–10),  $\text{Re}$  sulfide (analysis 12) and rhenite  $\text{ReS}_2$  (analysis 13).



**Рис. 5.** Зерна минеральной фазы Re–Fe–Pb–Bi–S, находящихся в халькопиритовой матрице (3, 5, 6, 7– соответствуют номерам анализов в табл. 5) (сняты в режиме BEI-compo).

**Fig. 5.** BEI-compo of the grains of the Re–Fe–Pb–Bi–S mineral phase located in the chalcopyrite matrix (3, 5, 6, 7– correspond to the numbers in Table 5).



**Рис. 6.** Зерна сульфидов Re–Pb–Fe (сняты в режиме BEI-compo), находящихся в халькопиритовой матрице (1–11 соответствуют номерам в табл. 6).

**Fig. 6.** BEI-compo images of the grains of the Re–Pb–Fe sulfides located in the chalcopyrite matrix (1–11 correspond to the numbers in Table 6).

Третья подгруппа состоит из пяти микрозерен, имеющих треугольную ( $2 \times 2.5$  мкм) и пятиугольную ( $2.5 \times 1.5$  мкм) формы. Они так же, как и микровключения дисульфида Re–Mo, находятся в халькопирите (рис. 4, микровключения 9–13). По соотношению Re, Cu, S и содержанию этих элементов их можно подразделить на семисульфид  $Re_2S_7$ , трисульфид  $Cu-ReS_3$ , трисульфид  $ReS_3$  и собственно дисульфид рения рениит ( $ReS_2$ ) (табл. 4, анализы микровключений 9–13).

В настоящее время установлены следующие сульфидные фазы рения:  $\text{ReS}$ ,  $\text{ReS}_2$ ,  $\text{Re}_2\text{S}_5$ ,  $\text{ReS}_3$  и  $\text{Re}_2\text{S}_7$  (Самсонов, Дроздова, 1972). Природное соединение  $\text{ReS}_2$  известно в минералогии как рениит (Знаменский и др., 2005).

Ранее было высказано мнение, что существование кристаллического  $\text{Re}_2\text{S}_7$  сомнительно (Самсонов, Дроздова, 1972). Однако несколько позднее было установлено, что сульфид рения (VII)  $\text{Re}_2\text{S}_7$  образует черно-бурые кристаллы тетрагональной сингонии (Химическая энциклопедия, 1995). А нами была получена близкая к идеальной формула:  $(\text{Re}_{1.98}\text{Fe}_{0.04})_{2.02}\text{S}_{6.98}$  этого природного соединения.

По данным дифференциально-термического анализа (Химическая энциклопедия, 1995), при  $370^\circ\text{C}$   $\text{Re}_2\text{S}_7$  разлагается с образованием  $\text{ReS}_3$ . Это соединение нами установлено в виде минеральной фазы  $\text{ReS}_3$ . Также были обнаружены фазы  $\text{CuReS}_3$  и  $\text{CuReS}_2$ .

В составе изученных медноколчеданных руд нам также удалось установить трисульфид  $\text{Re}(\text{Mo,Cu})\text{S}_3$ , который ранее был установлен в сульфидах комплекса Колдвелла, Онтарио (Mitchell et al., 1989) и месторождения Экойоки в Финляндии (Peltonen et al., 1995). Если рассмотреть кинетику восстановления  $\text{Re}_2\text{S}_7$ , то она выглядит следующим образом: происходит восстановление  $\text{Re}_2\text{S}_7$  до  $\text{ReS}_3$ ,  $\text{ReS}_3$  до  $\text{Re}_2\text{S}_5$ , а  $\text{Re}_2\text{S}_5$  до  $\text{ReS}_2$  (при  $200^\circ\text{C}$ ) и  $\text{ReS}_2$  до  $\text{Re}$  (при  $650\text{--}700^\circ\text{C}$ ). Не исключено, что в процессе дальнейших исследований будет обнаружена и минеральная фаза  $\text{Re}_2\text{S}_5$ .

**II группа.** К этой группе отнесены крайне редко встречающиеся минеральные фазы  $\text{Re-Pb-Fe-S}$ ,  $\text{Re-Pb-S}$  и  $\text{Re-Pb-Zn-S}$ , а сульфид  $\text{Pb-Fe-Re-Bi}$  вообще встречен впервые.

На полученных срезах в аншлифе микровключения сульфида  $\text{Pb-Fe-Re-Bi}$  наблюдаются в виде игл (рис. 5, микровключение 5) размером до 8 мкм по длинной стороне или серий сростков коромыслообразной формы (микровключение 7). Диаметр поперечных срезов не превышает 3 мкм, и эти срезы имеют округлую или эллипсоидальную форму (микровключение 7). Отдельные перьевидные индивиды минеральных фаз  $\text{Re-Pb-Zn-S}$  и  $\text{Re-Pb-Fe-S}$  достигают 6 мкм по длинной стороне (рис. 6, микровключения 4, 6). Минеральные фазы, не содержащие  $\text{Bi}$ , также образуют пластинки и сростки коромыслообразной формы (рис. 6, микровключения 8, 10).

Если проводить сопоставление обнаруженных нами сульфидов  $\text{Re-Fe-Pb-Bi}$  с таковыми медно-никелевого месторождения Садбери (Dare et al., 2010), то вряд ли мы найдем существенные отличия, кроме присутствия примесей  $\text{Zn}$  и  $\text{Sb}$ . Их формула имеет постоянный вид  $(\text{Re,Fe})(\text{Pb,Bi})\text{S}_3$ . Все ранее обнаруженные минеральные фазы  $\text{Re-Fe-Pb-Bi}$  были установлены в составе сульфидных руд, богатых пирротинном (Dare et al., 2010; Power et al., 2004). Установленная нами минеральная фаза  $\text{Re-Fe-Pb-Bi}$  встречается только в халькопирите, что исключает ограничение на образование  $\text{Re}$ -содержащих фаз только в составе богатых железом сульфидных расплавов.

При снижении концентрации  $\text{Fe}$  (табл. 5, анализы микровключений 6–8) изменяется и кристаллохимическая формула, которая отвечает дисульфиду  $(\text{Pb,Re,Fe,Bi})\text{S}_2$  с примесью  $\text{Rh}$  и  $\text{Sb}$ .

Кроме того, нами были обнаружены два зерна фазы  $\text{Pb-Re-Zn-S}$  (табл. 6, анализы микровключений 1, 2) и девять микровключений минеральной фазы  $\text{Pb-Re-Fe-S}$ . Все они по составу отвечают дисульфиду  $(\text{Re,Pb,Fe})\text{S}_2$  и  $(\text{Pb,Re,Fe})\text{S}_2$ .

## ВЫВОДЫ

Учитывая минеральный состав руд проявления Майке (Stepanets et al., 2019) и модель последовательности формирования минералов PGE, редких элементов и сульфидов медноколчеданных руд, разработанную ранее (Dare et al., 2010), можно предполо-

жить, что образование медноколчеданных руд Майке происходило под воздействием магматических и постмагматических процессов минералообразования.

Образование сульфидов  $\text{Re-Fe-Mo-Cu}$  и  $\text{Re-Mo-Cu}$  происходило в ходе эволюции сульфидного расплава при снижении температуры до  $650^\circ\text{C}$ . В ходе дальнейшего охлаждения сульфидного расплава и проявления гидротермальной активности могли формироваться минеральные фазы  $\text{Pb-Re-S}$ ,  $\text{Pb-Fe-Re-Bi-S}$ ,  $\text{Re-S}$ , что вполне согласуется с совместным нахождением в них  $\text{Pb}$  и  $\text{Bi}$ .

Авторы планируют дальнейшие исследования медноколчеданных руд Маятасского рудного района с тем, чтобы найти зерна сульфидов рения размера, достаточного для рентгеноструктурного анализа, а, может быть, и установить новые минеральные фазы. На возможность этого указывают данные, приведенные в статье.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан № 0302/ГФ 4 “Создание базы данных по уникальным, редким и недостаточно изученным минералам месторождений благородных и редких элементов Казахстана для комплексного освоения минерального сырья”.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам журнала “Записки Российского минералогического общества” за доброжелательные критические замечания, которые существенным образом способствовали улучшению качества рукописи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бетехтин А.Г.* Минералогия. М: Госгеолиздат, **1950**. 956 с.
- Бобров А.Б., Гурский Д.С., Гошовский С.В., Меркушин И.Е., Волошин А.В., Степанюк Л.Н., Лысенко А.А., Федоришин Ю.И.* Металлический рений в естественных геологических системах: первый мировой опыт описания на примере ультрабазитовых массивов Среднего Побужья (Украинский щит) // Сб. науч. пр. Укр. Гос. Геологоразведочного ин-та. **2007**. № 2. С. 60–82.
- Булах А.Г.* Руководство и таблицы для расчета формул минералов. М: Недра, **1964**. 132 с.
- Вишневецкая И.И., Трусова И.Ф.* Западно-Улытауский пояс ультраосновных и основных пород // Геология и разведка. **1967**. № 11. С. 32–43.
- Генкин А.Д., Поплавко Е.М., Горшков А.Н., Цепин А.Н., Сивцов А.В.* Новые данные о джезказганите – сульфиде рения, молибдена, меди, свинца из месторождения Джезказган (Казахстан) // Геол. рудных месторожд. **1994**. Т. 36. № 26. С. 536–544.
- Грачев А.Ф., Борисовский С.Е., Григорьева А.В.* Первая находка самородного рения в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы, Австрия) // Доклады РАН. **2008**. Т. 422. № 4. С. 513–515.
- Гурский Д.С., Бобров О.Б., Нахлупин В.Г., Меркушин И.Е., Волошин О.В., Степанюк Л.М., Лысенко О.А.* Первая находка самородного рения в ультрабазитовых массивах Среднего Побужья (Украинский щит) // Минеральные ресурсы Украины **2007**. № 1. С. 23–32.
- Знаменский В.С., Коржинский М.А., Штейнберг Г.С., Ткаченко С.И., Якушев А.И., Лапутина И.П., Брызгалов И.А., Самотин Н.Д., Магазина Л.О., Кузьмина О.В., Органова Н.И., Рассулов В.А., Чаплыгин И.В.* Рений,  $\text{ReS}_2$  – природный дисульфид рения из фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // ЗРМО. **2005**. № 5. С. 32–391.
- Косяк Е.А.* Состав рениевого минерала из руд Джезказгана // ЗВМО. **1968**. № 2. С. 213–216.
- Кулешевич Л.В., Лавров О.Б., Голубев А.И.* Золотосодержащее медно-сульфидное месторождение Воронов Бор и перспективы медносульфидных проявлений Карелии / Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, **2009**. Вып. 12. С. 26–47.
- Лавров О.Б., Кулешевич Л.В.* Первые находки рениевых минералов в Карелии. Докл. РАН. **2010**. Т. 432. № 1. С. 94–98.
- Нсанов Р.А.* Иттрий-редкоземельное оруденение в корах выветривания Маятасского рудного поля. Автореф. дисс. ... к. г-м. н. Алматы. **1993**. 17 с.
- Поплавко Е.М., Иванов В.В., Серкис Ю.Г.* О геохимических особенностях и условиях образования медистых песчаников и сланцев // Геохимия. **1977**. № 8. С. 1217–1233.
- Рафальсон М.Б., Сорокин Н.Д.* В кн.: Вопросы геохимии и типоморфизм минералов. Определение самородного рения в вольфрамитах методом локального рентгеноспектрального анализа. Л.: ЛГУ, **1976**. В. 1. С. 62–66.

Самтоин 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.

Самсонов Г.В., Дроздова С.В. Сульфиды. М.: Металлургия, **1972**. 304 с.

Турсебеков А.Х., Шарипов Х.Т., Турамуратов И.Б., Лузановский А.Г., Василевский Б.Б., Рахимов Р.Р. Рений Узбекистана // Горный Вестник Узбекистана. **2007**. № 4(31). С. 14–21.

Файн Э.Е. Рений и радиогенный осмий в природных объектах и технологических процессах. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Алматы. **1996**. 102 с.

Химическая энциклопедия / Ред. Кнунянц И.Л. М.: Советская энциклопедия, **1995**. Т4. 639 с.

Чудин С.С., Воинов В.Н. Природные фуллерены Северного Казахстана // Горно-геологический журнал. **2013**. № 1. С. 7–10.

### Discovery of Rhenium Sulfides in Copper Sulfide Ores from the Mayke Ore Occurrence (Ulytau, Central Kazakhstan)

V. L. Levin<sup>a, \*</sup>, V. G. Stepanets<sup>b, \*\*</sup>, E. S. Li<sup>c, \*\*\*</sup>,  
G. K. Bekenova<sup>a, \*</sup>, and M. S. Khakimzhanov<sup>d, \*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>LLP "Satpayev Institute of Geological Sciences", Satpayev University, Almaty, Kazakhstan

<sup>b</sup>Astra Mining Ltd, London, UK

<sup>c</sup>Karaganda state technical university, Karaganda, Kazakhstan

<sup>d</sup>SRK Consulting (Kazakhstan) Ltd, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: levin\_v@inbox.ru, bekenova@mail.ru

\*\*e-mail: wladimir@stepanez.de

\*\*\*e-mail: li\_elen.kstu@mail.ru

\*\*\*\*e-mail: mkhakimzhanov@srk.kz

During mineralogical studying of copper–pyrite ores from the Mayke ore occurrence of Northern Ulytau, microinclusions of sulfides with rhenium, molybdenum, copper, lead, and bismuth in different proportions were found. Microinclusions differ in shape and chemical composition. Determined by microprobe the chemical compositions of the 8 sulfides include rhenium (up to 49.46 wt %), iron, copper, molybdenum, lead, and bismuth. Calculated crystal chemical formulas the sulfides: (Re,Mo,Cu ± Fe,Os,Pt)<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, (Re,Mo)S<sub>2</sub>, ReS<sub>3</sub>, Re<sub>2</sub>S<sub>7</sub>, (Pb,Re,Zn)S<sub>2</sub>, (Pb,Re,Fe)S<sub>2</sub>, (Pb,Re,Fe)<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, (Re,Fe)(Pb,Bi)S<sub>3</sub>. First discovered: the Pb–Re–Zn–S phase; Rh and Sb were found together in the Re–Fe–Pb–Bi–S mineral phase; first identified ReS<sub>3</sub> and Re<sub>2</sub>S<sub>7</sub> rhenium sulfides.

**Keywords:** Kazakhstan, Northern Ulytau, copper-pyrite ores, mineral phases of rhenium, lead, copper, molybdenum and bismuth

### REFERENCES

Barkov A.Y., Lednev A.I. A rhenium-molybdenum-copper sulfide from the Lukkulaivarra layered intrusion, northern Karelia, Russia. *Eur. J. Miner.* **1993**. Vol. 6. P. 1227–1233.

Bernard A., Dumortier P. Identification of natural rhenium sulfide (ReS<sub>2</sub>) in volcanic fumaroles from Usu volcano, Hokkaido, Japan *Proc. XI Int. Cong. on Electron Microscopy*. Kyoto. **1986**. P. 691–693.

Betekhtin A.G. Mineralogy. Moscow: Gosgeolizdat, **1950**. 956 p. (in Russian).

Bobrov A.B., Gursky D.S., Goshovsky S.V., Merkushev I.E., Voloshin A.V., Stepanyuk L.N., Lysenko A.A., Fedorishin Yu.I. Metal rhenium in natural geological systems: the first world experience of description on the example of the ultrabasic massifs of the Middle Pobuzh'ya (Ukrainian shield). In: *Sat sci. pr. Ukr. State Geological Prospecting Institute*. **2007**. N 2. P. 60–82 (in Ukrainian).

Bulakh A.G. Manual and tables for the calculation of mineral formulas. Moscow: Nedra, **1964**. 132 p. (in Russian).

Chemical Encyclopedia. Ed. Knunyants I.L. Moscow: Soviet Encyclopedia, **1995**. Vol. 4. 639 p. (in Russian).

Chudin S.S., Voinov V.N. Natural fullerenes of Northern Kazakhstan. *Mining and Geological J.* **2013**. N 1. P. 7–10 (in Russian).

Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H.M., Fisher P.C. The timing and formation of platinum-group minerals from the Creighton Ni-Cu-platinum-group element sulfide deposit, Sudbury, Canada: Early crystallization of PGE-rich sulfarsenides. *Soc. Econ. Geologists, Inc. Econ. Geology*. **2010**. Vol. 105. P. 1071–1096.

Drábek M., Rieder M.B., Hmová V. The Re-Mo-S system: New data on phase relations between 400 and 1200 °C. *Eur. J. Miner.* **2010**. Vol. 22. P. 479–484.

Ekström M., Hålenius, U. A new rhenium-rich sulfide from two Swedish localities. *N. Jb. Miner. Mnh.* **1982**. Vol. 1. P. 6–10.

Fine E.E. Rhenium and radiogenic osmium in the natural objects and technological processes. *Doktoral thesis*. Almaty, **1996**. 102 p.

Grachev A.F., Borisovskiy S.E., Grigor'eva A.V. The first find of native rhenium in the transition layer of clays at the border of the Cretaceous and Paleogene in the Gams section (Eastern Alps, Austria). *Doklady Earth Sci.* **2008**. Vol. 422. N 1. P. 1065–1067.

Genkin A.D., Poplavko E.M., Gorshkov A.N., Tsepin A.N., Sivtsov A.V. New data on dzhezkazganite – sulfide of rhenium, molybdenum, copper, lead from the Dzhezkazgan deposit (Kazakhstan). *Geol. Ore Deposits*. **1994**. Vol. 36. N 26. P. 536–544 (in Russian).

Gursky D.S., Bobrov O.B., Nakhlopun V.G., Merkushev I.E., Voloshin O.V., Stepanyuk L.M., Lysenko O.A. The first finding of native rhenium in ultrabasic massifs of the Middle Bourgeois (Ukrainian shield). *Miner. Res. of Ukraine*. **2007**. N 1. P. 23–32 (in Ukrainian).

Kojonen K.K., Roberts A.C., Isomaki O.P., Knauff V.V., Johanson B., Pakkanen L. Tarkianite, (Cu,Fe)(Re,Mo)<sub>4</sub>S<sub>8</sub>, a new mineral species from the Hitura mine, Nivala, Finland. *Canad. Miner.* **2004**. Vol. 42. P. 539–544.

Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I., Taran Yu. A., Shteinberg G. S. Discovery of pure rhenium mineral at Kudriav volcano. *Nature*. **1994**. Vol. 369. P. 51–52.

Kosyak E.A. Composition of rhenium mineral from Zhezkazgan ores. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1968**. Vol. 97. N 2. P. 213–216 (in Russian).

Kuleshevich L.V., Lavrov O.B., Golubev A.I. Voronov Bor gold-bearing copper-sulphide deposit and the prospects for the copper-sulphide ore outputs of Karelia. *Geology and minerals of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS, **2009**. Vol. 12. P. 26–47 (in Russian).

Lavrov O.B., Kuleshevich L.V. The first finds of rhenium minerals in Karelia. *Doklady Earth Sci.* **2010**. Vol. 432. N 1. P. 598–601.

Mitchell R.H., Laflamme J.H., Cabri L.J. Rhenium sulfide from the Coldwell Complex, northwestern Ontario. *Miner. Mag.* **1989**. Vol. 53. P. 635–637.

Nsanov R.A. Yttrium – rare-earth mineralization in the weathering crust of the Mayatass ore field. PhD thesis syn. Almaty, **1993**. 17 p. (in Russian).

Panagiotis V., Vasilios M., Paul G.S., Luca B., Robert M., Melissa O., Tamara K. Extremely Re-rich molybdenite from porphyry Cu–Mo–Au prospects in Northeastern Greece: Mode of occurrence causes of enrichment, and Implications for gold exploration. *Minerals*. **2013**. Vol. 3. P. 165–191.

Peltonen P., Pakkanen L., Johanson B. Re–Mo–Cu–Os sulphide from the Ekojoki Ni–Cu deposit, SW Finland. *Miner. Petrol.* **1995**. Vol. 52. P. 257–264.

Poplavko E.M., Ivanov V.V., Serkis Yu. G. On geochemical features and conditions for the formation of copper sandstones and shale. *Geochemistry*. **1977**. N 8. P. 1217–1233 (in Russian).

Power M.R., Pirrie D., Jedwab J., Stanley C.J. Platinum-group element mineralization in an As-rich magmatic sulfide system, Talnotry, southwest Scotland. *Miner. Mag.* **2004**. Vol. 68. P. 395–411.

Rafalson M.B., Sorokin N.D. Determination of native rhenium in wolframite by the method of local X-ray spectral analysis. In: *Geochemistry issues and mineral typomorphism*. Leningrad: LSU, **1976**. Vol. 1. P. 62–66 (in Russian).

Samotoin N.D., Magazina L.O., Znamenskii V.S. Structural and morphological characteristics of natural rhenium disulfide from fumarole of Kudryavyy volcano, Iturup Island, Kuril Islands. *Doklady Russian Acad. Sci.* **1995**. Vol. 345. N 4. P. 518–522 (in Russian).

Samsonov G.V., Drozdova S.V. Sulphides. Moscow: Metallurgy, **1972**. 304 p. (in Russian).

Stepanets V.G., Levin V.L., Bekenova G.K., Li E.S., Zhukov N.M., Khakimzhanov M. Minerals of noble and rare elements in karatargay and mayke ore types of Mayatass ore region (North Ulytau, Kazakhstan). *News NAN PR. Series of geology and technical*. **2019**. Vol. 2. P. 21–29.

Tarkian M., Housley R.M., Volborth R.M., Greis O., Moh G. Unnamed Re-Mo-Cu sulfide from the Stillwater Complex, and crystal chemistry of its synthetic equivalent spinel type (Cu, Fe)(Re, Mo)<sub>4</sub>S<sub>8</sub>. *Eur. J. Miner.* **1991**. Vol. 3. P. 977–982.

Turesbekov A.Kh., Sharipov Kh.T., Turamuratov I.B., Luzanovsky A.G., Vasilevsky B.B., Rakhimov R.R. Rhenium of Uzbekistan. *Mining Herald of Uzbekistan*. **2007**. N 1. P. 14–21 (in Russian).

Voudouris P.C., Melfos V., Spry P.G., Bindi L., Kartal T., Arikas K., Moritz, R., Orтели M. Rhenium-rich molybdenite and rheniite (ReS<sub>2</sub>) in the Pagoni Rachi-Kirki Mo–Cu–Te–Ag–Au deposit, North-



ern Greece: Implications for the rhenium geochemistry of porphyry style Cu–Mo and Mo mineralization. *Canad. Miner.* **2009**. Vol. 47. P. 1013–1036.

*Vishnevskaya I.I., Trusova I.F.* West Ulytau belt of ultrabasic and basic rocks. *Geology and exploration.* **1967**. N 11. P. 32–43 (*in Russian*).

*Znamenskii V.S., YakushJev A.I.* Das erste Rhenium-Mineral vom Vulkan Kudriavy, Kurilen. *Lapis.* **2000**. Jg. 25. N 1. P. 21.

*Znamenskii V.S., Korzhinsky M.A., Shteinberg G.S., Tkachenko S.I., Yakushev A.I., Laputina I.P., Bryzgalov I.A., Samotoin N. D., Magazina L. O., Kuzmina O.V., Organova N.I., Rassulov V.A., Chaplygin I.V.* Rhenite,  $\text{ReS}_2$  – natural rhenium disulphide from the fumarol of the Kudryavy volcano (Iturup island, Kuril Islands). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.).* **2005**. Vol. 134. N 5. P. 32–391 (*in Russian*).