

УДК 551.231

САМОРОДНАЯ СЕРА ФУМАРОЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ВУЛКАНОВ
ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ*Плутахина Е.Ю.^{1,2}, Малик Н.А.¹, Назарова М.А.¹*¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*²*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга
г. Петропавловск-Камчатский**Научный руководитель: к.г.-м.н. Округин В.М.*

В данной работе представлены результаты исследований самородной серы fumarольных полей таких активных вулканов Камчатки, как Авачинский, Корякский, Мутновский, Кизимен, выполненных в 2013-2015 гг. с применением современных физико-химических методов анализа. Приводятся данные о морфологии, структуре, химическом составе самородной серы.

Ключевые слова: сера, фумаролы, вулкан, селен, теллур, Камчатка,

ВВЕДЕНИЕ

Активные вулканы Камчатки – природные геохимические реакторы, выносящие на земную поверхность большое количество химических элементов и соединений. Фумарольные газы, проходя по сложной системе ослабленных зон, реагируя с вмещающими породами, изменяясь при конденсации и испарении, образуют возгоны – твердые минеральные фазы, несущие в себе информацию об изменениях, произошедших с вулканом.

Самородная сера – один из самых распространённых минералов продуктов вулканической деятельности. Она сублимируется из фумарольных газов в зонах температурных барьеров и её можно применять для определения физико-химических условий относительно длительных периодов фумарольной деятельности.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авачинский вулкан – один из наиболее активных вулканов Камчатки, расположенный вблизи (23-30 км) Петропавловск-Елизовской городской агломерации. Вулкан типа Сомма-Везувий, современный конус которого сложен порода-

ми андезибазальтового состава. В результате последнего эффузивно-эксплозивного извержения 1991 г. лава заполнила кратер вулкана. В октябре 2001 г. фреатическими взрывами лавовая «пробка» была нарушена системой субпараллельных трещин, к наиболее длинной и мощной из которых приурочены крупные фумарольные площадки – Западная фумарола и Восточное поле [3]. Низкотемпературные ($<98\text{ }^{\circ}\text{C}$) выходы газа расположены на гребне кратера (Серный Гребень) и контакте «пробки» со стенками кратера (рис. 1).

Восточное фумарольное поле размером $\sim 50\times 30$ м вытянуто вдоль трещины в юго-восточной части лавовой «пробки» и представляет собой скопление выходов газа (T до $500\text{-}665^{\circ}\text{C}$), обрамленных инкрустациями. Необходимые для изучения образцы были отобраны в северной части поля возле «Режимной фумаролы 1» с температурами $585\text{-}630^{\circ}\text{C}$.

Температура фумарол Серного гребня, вытянутого вдоль северо-западной части кромки кратера, не превышает 98°C . В соответствии со своим названием, это поле почти полностью покрыто коркой плотной массивной серы, все породы сильно изменены.

Корякский вулкан – стратовулкан, сложенный породами от базальтового до андезитового составов. Фумарольное поле, образовавшееся во время извержения

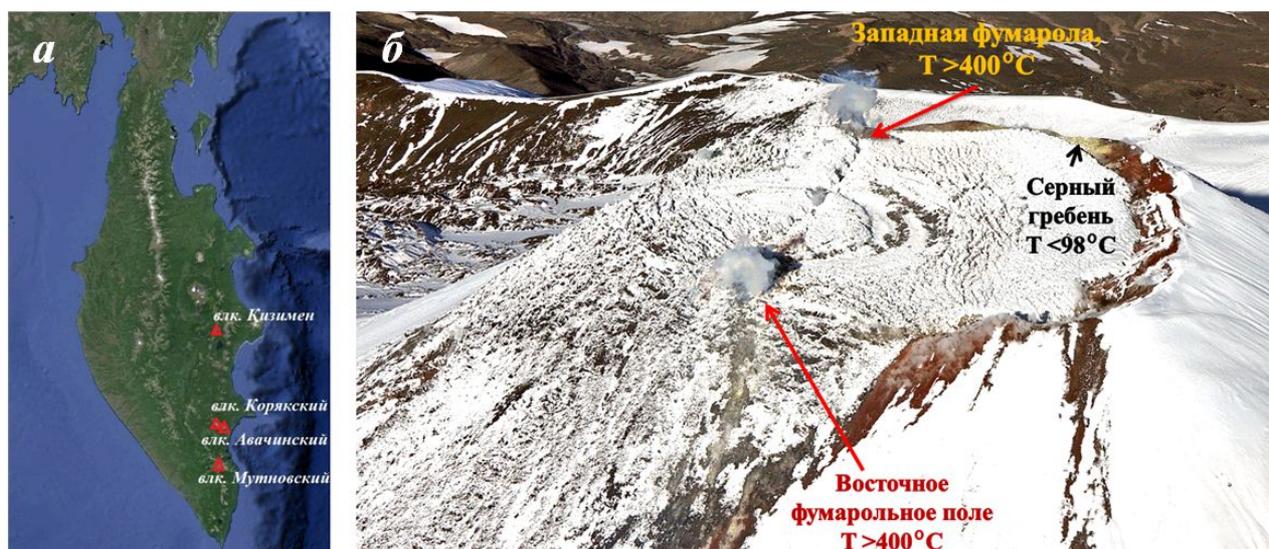


Рис. 1. Карта Камчатского полуострова с расположением: а – объектов исследования; б – фумарольных полей привершинной части Авачинского вулкана.

1956-57 гг., находится на северо-западном склоне с абсолютной высотой около 3000 м (на 500 м ниже вершины). Наибольшие температуры газов, измеренные в 1983 и 1994 гг., не превышали 220°C [7]. После гидротермально-фреатического извержения 2009 г. морфология поля и максимальные температуры фумарол изменились. Во время обследования и отбора проб в апреле 2014 г. наблюдался прогрев склона, начиная с высоты ~ 2820 м. На высоте ~2900 м располагалась фумарольная площадка с многочисленными выходами газа (Т 96-100°C), инкрустированными возгонами, содержащими самородную серу (рис.2). Образцы для исследований взяты в южной части поля около трещины с интенсивным выходом газа (Т ~ 317°C).

Мутновский вулкан – вулканический хребет, состоящий из трех слившихся стратоконусов, находящийся в 70 км к югу от г. Петропавловск-Камчатский (рис. 3а). Продукты извержений – от базальтов до риодацитов; тефра последних извержений представлена базальтами. Образцы самородной серы взяты на Донном и Верхнем фумарольных полях (Т=98-280°C), расположенных в Северо-восточном кратере, и фумарол Активной воронки в Юго-западном кратере, фумарольные газы которой содержат наивысшие концентрации магматических компонентов для всего района [2] (рис.3б).



Рис. 2. Корякский вулкан: а – общий вид вулканической постройки; б – агрегат самородной серы.



Рис. 3. Мугновский вулкан: а – общий вид вулкана; б – агрегат самородной серы.

Вулкан Кизимен – одиночный конус со сложным строением. Породы представлены роговообманковыми андезитами, дацитами, андезибазальтами и базальтами [6] (рис. 4а). До извержения 2010-2013 гг. на северо-западном склоне вулкана с абсолютной высотой 1950 м (в 400 м ниже вершины) располагалась единственная постоянно действующая фумарольная площадка, известная с 1825 г.

В октябре 2014 г. при посещении привершинного фумарольного поля, появившегося на западном склоне вулкана (на высотах от 2250 м и до вершины), были отобраны две группы образцов с самородной серой: а) возле самой высокотемпературной фумаролы ($T \approx 270^\circ\text{C}$); б) около низкотемпературных ($T \leq 100^\circ\text{C}$) газовых выходов (рис. 4б).

ЦЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследований – изучение типоморфных особенностей минералов, происхождение которых связано с вулканической деятельностью.

Задача – получение новых данных о типоморфных особенностях (габитус, микроморфология, структура, химический состав) фумарольной серы активных вулканов Камчатки.

Методы исследований: – классическая минералогия и минераграфия; – рентгенофазовый анализ (XRD-7000 MAXima Shimadzu); – аналитическая



Рис. 4. Вулкан Кизимен: а – общий вид вулканической постройки; б – самородная сера на фумарольной площадке.

сканирующая электронная микроскопия (Vega3 Tescan с программным обеспечением Oxford Instruments, Аналитический Центр, лаборатория вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский); – масс-спектрометрия с индукционно связанной плазмой (ICP-MS, АСИЦ ИПТМ РАН, г. Черноголовка).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Самородная сера фумарольных площадок различается по: - цвету; - морфологии; - количеству механических загрязнений; - химическому составу.

Сера Авачинского вулкана. Установлено два вида серы – сера с Серного гребня, Западной трещины и сера с Восточного поля. Сера Серного гребня мелкокристаллическая, кристаллы ромбодипирамидальные со ступенчатыми структурами роста на гранях, в массивных агрегатах ярко-желтые (рис. 5а). Сера Восточного фумарольного поля представлена отдельными дендритовидными и скелетными агрегатами до 1-2 мм длиной. Морфология - характерная для псевдоморфоз ромбической серы по моноклинной [1]). Микроромбические и усечено-пирамидальные. В плотных корках и натечных агрегатах сера бывает аморфной (агрегат с раковистым сколом, на дифрактограмме проявляется в виде гало). Встречаются макроскопические каналы продувки и трубкообразные формы роста. Микроморфология серы часто совпадает с основ-

ной морфологией, за исключением появления пинакоидальных, толстопризматических и шарообразных форм. Интенсивность цвета нарастает от лимонно-желтого до рыжеватого при увеличении концентраций селена, теллура, мышьяка от 10 ppm.

Сера Корякского вулкана. Агрегаты рыхлые, кристаллические, желтого цвета, с минимальными следами оплавления (рис. 5б). Зеленоватый оттенок в единичных кристаллах, обусловлен тесным срастанием серы с нашатырем, вплоть до невозможности выделения монофракции. Белые оттенки агрегатов связаны с мелкой размерностью частиц серы и ассоциирующих минералов, серые оттенки – только с механическим загрязнением.

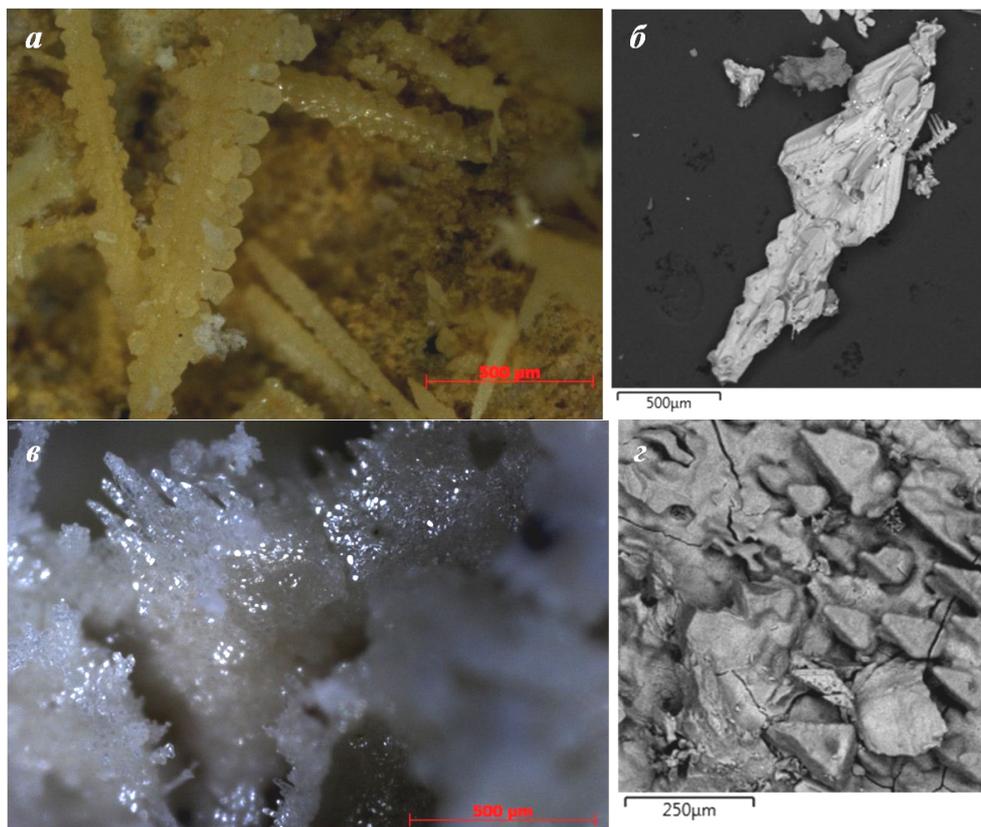


Рис. 5. Микроморфология самородной фумарольной серы: а,б – вулкан Аватчинский, Восточное фумарольное поле; в,г – вулкан Корякский.

Сера Мутновского вулкана. Агрегаты плотные, слегка оплавленные, преимущественно ярко-желтых оттенков. На сколе микроромбические формы, структуры роста на гранях практически не выражены (рис. 6а). Кристал-

лов с морфологией, похожей на псевдоморфозы ромбической серы по моноклинной не обнаружено. Редко встречаются тонкие трубкообразные формы роста.

Сера вулкана Кизимен. Цвет желтый с зеленоватым оттенком. Агрегаты кристаллические плотные; кристаллики с поверхности агрегатов с оплавленными гранями, часто с механическим загрязнением ассоциирующими минералами (опал, гипс, сульфат меди) и обломками пород. Плотные, массивные, агрегаты с натечными формами на внешней поверхности имеют «поры», в которых диагностированы скелетные структуры нашатыря (рис. 6б) [5].

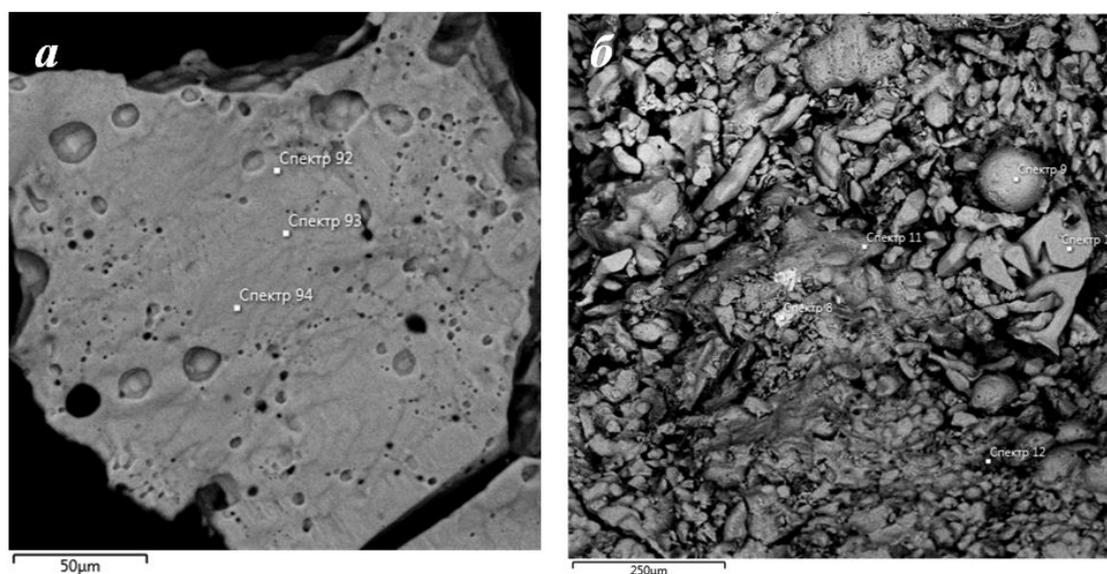


Рис. 6. Микроморфология самородной фумарольной серы: а – вулкан Мутновский; б – вулкан Кизимен.

Для проверки степени достоверности определения методами рентгенофазового анализа наличия самородной серы в смеси с другими веществами был проведен эксперимент. Для этого самородная сера смешивалась в разных пропорциях с другими минералами возгонов (рис. 7).

Эксперимент подтвердил достоверность определения присутствия самородной серы в смесях, различающихся количеством «механических» примесных компонентов. Замечено, что увеличивающееся гало, видимое на дифрактограммах, служит первым признаком плохо подготовленной монофракции.

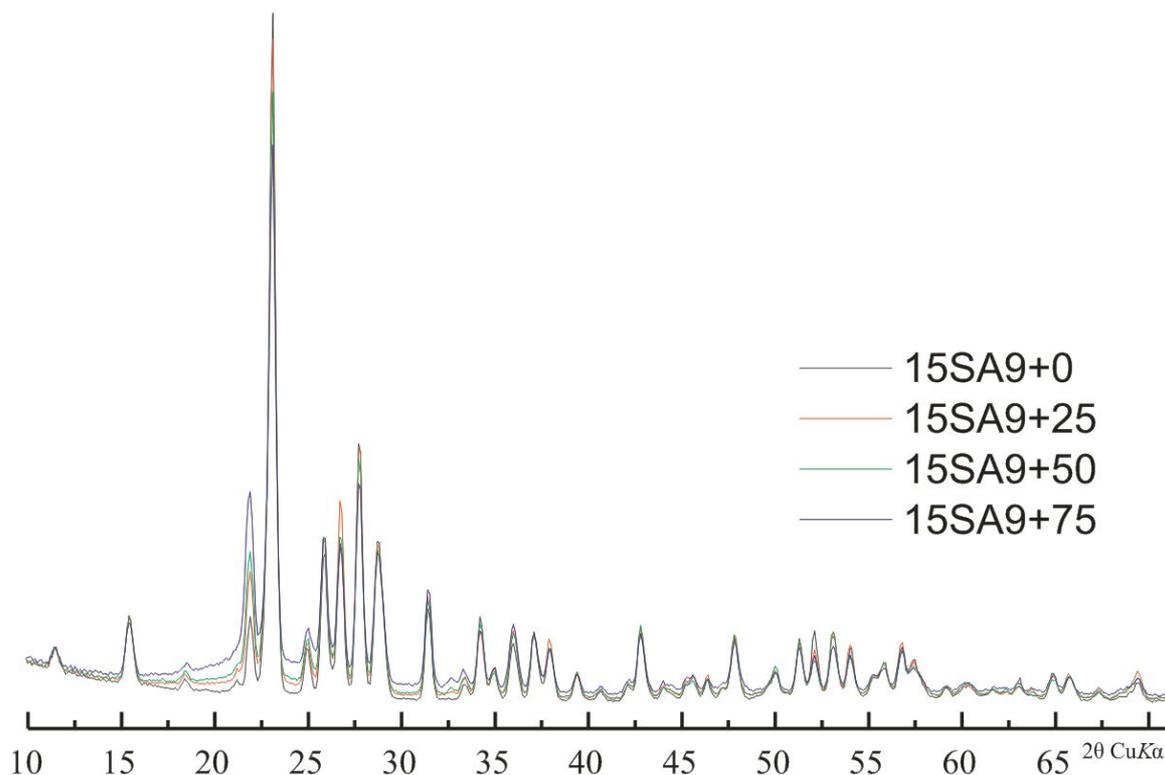


Рис. 7. Результат сопоставления данных по экспериментальной оценке надежности диагностики методом рентгенофазового анализа смесей самородной серы, «загрязненных» присутствием других веществ. 15SA9 – номер пробы, число после знака «+» - массовый процент загрязняющего вещества.

В таблице 1 приведены результаты анализа монофракций серы методами ИСР. Для анализа были взяты образцы серы наиболее близкие по цвету (желтые, преимущественно без оттенков), морфологии (кристаллы ромбического габитуса) и условиям взятия исходных проб (температуры опробования $100 \pm 20^\circ\text{C}$).

При изучении образцов методами сканирующей электронной микроскопии на приборе SEM Vega3 Tescan наибольшее количество «затравок» ассоциирующих минералов было диагностировано на агрегатах фумарольной серы Авачинского вулкана. Этот факт может объясняться сложной микроморфологией поверхности (структурные, каркасные, нитевидные формы роста), способствующей росту нанокристаллов других минералов. Четкого зонального строения кристаллов серы, обусловленного локальным концентрированием теллура или селена не установлено.

Таблица 1. Химический состав самородной серы fumarольных полей активных вулканов (ppm)

Элемент	ПО, мкг/г	Авачинский	Корякский	Мутновский	Кизимен
B	1	< ПО	< ПО	6.3	< ПО
Na	13	< ПО	< ПО	51.5	< ПО
Mg	3	< ПО	< ПО	55.2	< ПО
Al	2	20.3	< 170	543	< ПО
P	3	15.0	177	< ПО	< ПО
K	3	2.5	< ПО	20.0	10.3
Ca	2	14.5	< ПО	242	57.7
Mn	0.09	< ПО	< ПО	3.0	0.28
Fe	0.8	17.3	33.4	331	19.6
Se	0.5	4.9	< ПО	207	637
Zr	0.3	2.5	2.5	< ПО	< ПО
Te	0.02	< ПО	< ПО	3.3	0.84
Ba	0.03	0.10	0.2	0.30	0.38
Hg	0.03	< ПО	< ПО	0.57	0.57
Tl	0.001	< ПО	< ПО	0.0075	< ПО
Pb	0.1	< ПО	0.82	0.66	< ПО
Bi	0.06	< ПО	< ПО	0.023	< ПО

Примечание: ПО - предел обнаружения; <ПО – ниже предела обнаружения; Li, Be, Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Br, Rb, Sr, Y, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Th, U – содержания ниже предела обнаружения или не превышают его в 3 раза; жирным выделены характерные элементы-примеси самородной серы.

ВЫВОДЫ

Самородная сера – один из основных минералов fumarольных площадок активных камчатских вулканов Авачинский, Корякский, Мутновский, Кизимен. Её морфология и химический состав зависят от температур вулканических газов как во время образования, так и последующих преобразованиях.

Только на Авачинском вулкане найдены агрегаты fumarольной серы с морфологией, соответствующей псевдоморфозе ромбической серы по моноклинной.

Самородная сера вулканов Корякский и Кизимен находится в тесной ассоциации с нашатырем. В ней присутствует селен и отсутствует мышьяк.

Самородная сера Авачинского и Мутновского вулканов отличается аномальными концентрациями селена и теллура.

Вариации типоморфных особенностей самородной серы (минеральные ассоциации, морфология, химический состав) fumarольных выходов таких действующих вулканов как Авачинский и Кизимен могут быть использованы в качестве одного из признаков изменений их активности.

Авторы признательны Округиной А.М., Чебровой Н.И., Курносовой Н.Ю., Карташевой Е.В., Куликову В.В., Куликовой Р.Н., Лунькову В.Ф., Платонову А.А., Кудяевой Ш.С., Зобенько О.А., Яблоковой Д.А., Карандашеву В.К., Гайдамако И.М., Косорукову В.Л. за помощь в сборе, подготовке каменного материала и проведении химико-аналитических исследований, интерпретации полученных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вулканические серные месторождения и некоторые проблемы гидротермального рудообразования, под ред. Власова Г.М. М., 1971.
2. Зеленский М.Е., Таран Ю.А., Дубинина Е.О. и др. Источники летучих компонентов для вулкана зоны субдукции: Мутновский вулкан, Камчатка // Геохимия. 2012. № 6. С. 555–575.
3. Малик Н.А., Зеленский М.Е. О температуре и составе газа fumarол вулкана Авачинский в 2012–2013 г. // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. - Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 94-97.
4. Малик Н.А., Максимов А.П., Ананьев В.В. Извержения вулкана Кизимен в 2010-2012 гг. и его продукты // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29 - 30 марта 2012 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 64-70.
5. Малик Н.А., Плутахина Е.Ю. Самородная сера вулкана Кизимен // Материалы XII Региональной молодежной научной конференции «Исследования в области наук о Земле» 25 ноября 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 31-38.
6. Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Волынец О.Н. Вулкан Кизимен (Камчатка) – будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 3-32.
7. Taran Y.A., Cornor C.B., Shapar V.N. et al. Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes, Kamchatka, from 1993 to 1994 // Bull. Volcan. 1997. V. 58. P. 441-448.

FUMAROLIC NATIVE SULFUR OF EASTERN KAMCHATKA VOLCANOES

Plutahina E. Yu., Malik N.A, Nazarova M.A.

This paper presents the results of research of native sulfur from fumarolic fields of Avachinsky, Koryaksky, Mutnovsky and Kizimen volcanoes carried out in 2013-2015. The data on the morphology, crystal structure, chemical composition of native sulfur is summarized.

Keywords: sulfur, fumarole, volcanoes, Kamchatka.