

УДК 553.3/4:553.2

## ПИРИТ ВУЛКАНА ПАПАНДАЙЯН (ИНДОНЕЗИЯ)

**Зобенько О.А.<sup>1</sup>, Яблокова Д.А.<sup>1,2</sup>, Чубаров М.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга*

<sup>2</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

*Научный руководитель к.г.-м.н. Округин В.М.*

Вулкан Папандайян находится на о. Ява (Индонезия). По своему строению, истории вулканической деятельности он напоминает вулкан Мутновский (Южная Камчатка). Он относится к числу активных и в его кратерах наблюдается интенсивная фумарольная деятельность с отложением разнообразных возгонов. Авторами изучен минеральный состав вулканитов «измененных» процессами фумарольной деятельности. Среди них диагностированы каолинит, галотрихит, самородная сера, ангидрит, хлориты. Особое внимание уделено пириту. Применение минералого-геохимических и физико-химических методов исследования позволило получить новую информацию о микроморфологии, химическом составе пирита и ассоциирующих с ним минералов. По типоморфным особенностям пирит вулкана Папандайян обнаруживает признаки сходства с пиритом вулкана Мутновский.

*Ключевые слова: пирит, вулкан Папандайян, Индонезия, типоморфизм*

### ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Папандайян - действующий стратовулкан Индонезии. Он находится на острове Ява в 162 км от г. Джакарта.

Вулкан можно рассматривать в качестве аналога Мутновского вулкана (Южная Камчатка). Высота вулкана 2 665 метров (у Мутновского - 2 323 м) над уровнем моря. У подножия вулкана и на его склонах располагаются многочисленные грязевые котлы, горячие источники и гейзеры. Он также как и Мутновский вулкан характеризуется сложным строением. У него четыре вершинных кратера, которые получили названия Кавах Мас, Кавах Бару, Кавах Нангклак, Кавах Манук.

Во время посещения и отбора образцов вулкан находился в стадии достаточно активной фумарольной деятельности (декабрь 2012 г.). Наиболее сильные извержения происходили в 1772, 1923 - 1926, 2002 - 2003, 2008 и 2011 гг.



Рис. 1. Расположение (а) и общий вид (б) вулкана Папандайян.

Одно из самых мощнейших извержений случилось в 1772 г. Тогда обрушились стенки одного из кратеров вулкана, огромная лавина обломков и лавы уничтожила его окрестности. Конус вулкана буквально утонул в огромном кипящем лавовом озере вместе с людьми, населявшими склоны. Погибло около трех тысяч местных жителей. В последние годы наблюдалось неоднократное обрушение и образование новых кратеров [3].

## ЦЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель - исследование типоморфных особенностей пирита, который образуется в постмагматическую фумарольно-сульфатарную стадию деятельности вулканов.

Задачи: - изучение морфологии и микроструктуры, химического состава (однородность - неоднородность) и минеральных ассоциаций пирита фумарольных площадок вулкана Папандайян; - сравнение полученных результатов с данными по пириту Мутновского вулкана.

Методы исследований: - классическая минералогия, минераграфия с использованием микроскопов Axioskop 40, Discovery (Carl Zeiss); - рентгеноспектральный с электронным зондом микроанализ (Camebax, укомплектованный новейшим энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80); - аналитическая сканирующая электронная микроскопия Vega 3 Tescan; - масс-спектрометрия с индукционно связанной плазмой (ICP).

Пирит - один из самых распространенных минералов в Природе. Знание его типоморфных особенностей играет большую роль для понимания процессов рудообразования и выявления геохимических особенностей минералообразующей среды.

К типоморфным свойствам минералов относят морфологические особенности (габитус, двойниковое строение, агрегатное состояние), размер, цвет, минеральные ассоциации, химический состав (стехиометричность, неоднородность, элементы-примеси) [1].

Образцы для исследований были отобраны В.М. Округиным в кратере вулкана Папандайян. Они представляют собой измененные породы - продукты реакции в системе вулканический газ - порода (рис. 2, 3).



Рис. 2. Фумарольные площадки вулкана Папандайян (а) и отложения самородной серы (б).

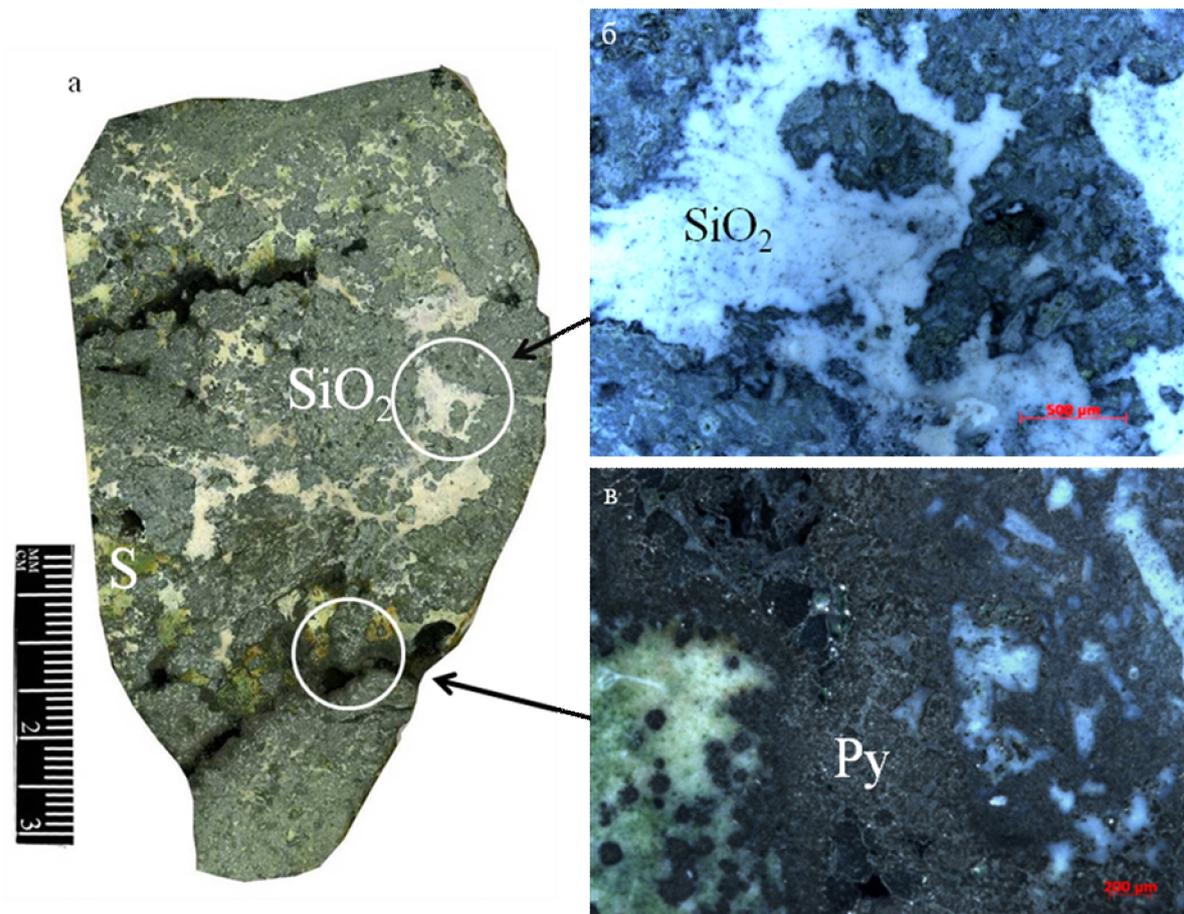


Рис. 3. а - образец кратерных отложений; б - рассеянная вкрапленность пирита; в - тонкозернистые агрегаты пирита, приуроченные к микротрещинкам - порам. (Py) - пирит, (S) - сера,  $\text{SiO}_2$  - минералы группы кремнезема.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пирит присутствует в виде единичных кристаллов и гнезд, в сростании с алунином, каолинитом, самородной серой, сульфатами типа галотрихита и ангидрита. Агрегаты пирита образуют каймы вокруг крупных порканалов, своеобразные «просечки», убогую вкрапленность в матрице.

Изучение микроморфологии пирита в отраженном свете и с помощью сканирующего электронного микроскопа показало, что минерал представлен как единичными кристаллами размером от 5 до 300 мкм, так и в виде гнезд и друз до 1 мм (рис. 4).

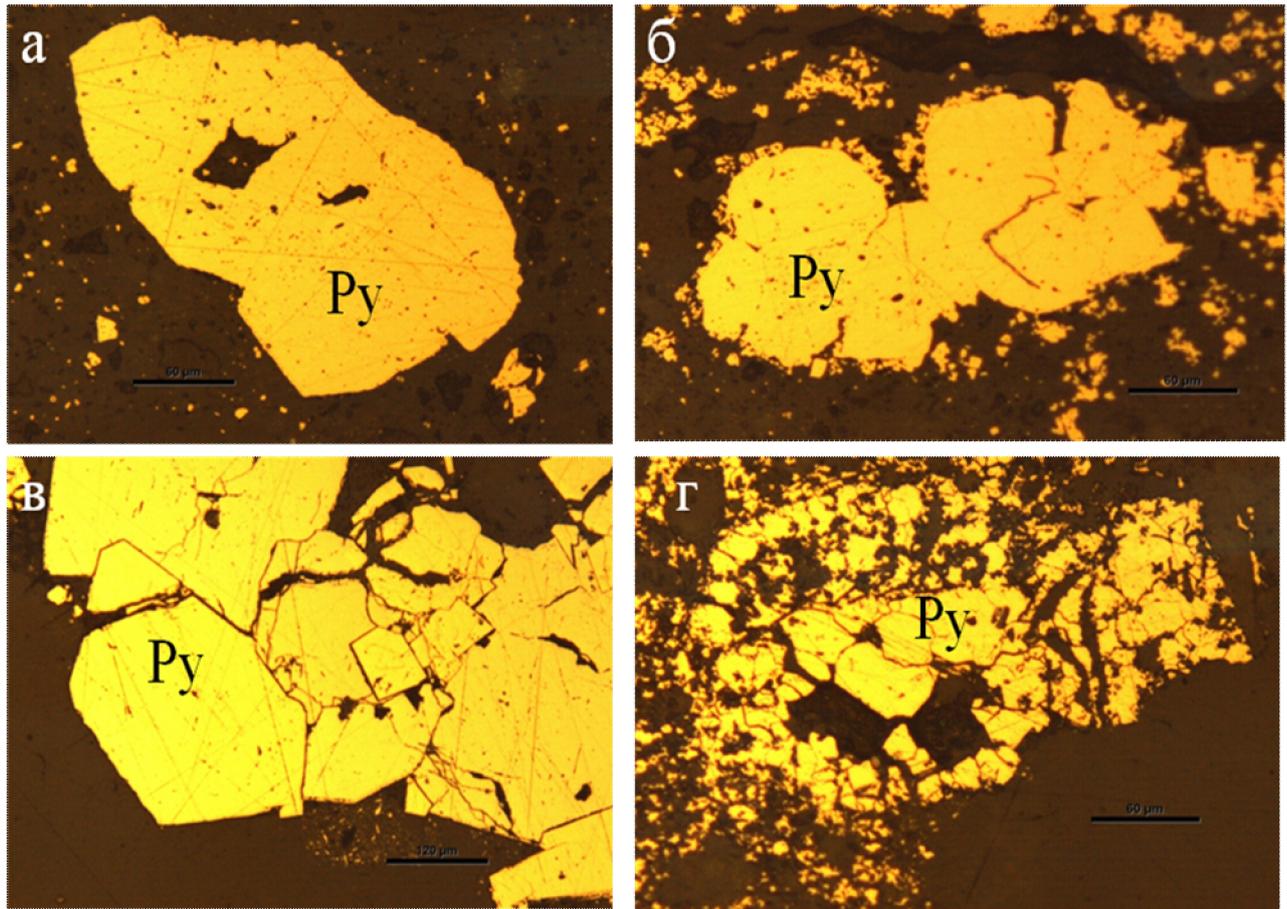


Рис. 4. Формы выделения пирита: а) единичное зерно; б) срастание нескольких не-больших зерен, окруженных мелкими, возможно, более поздними агрегатами; в) срастания зерен, с вросшими идиоморфными, кубическими и пентагондодекаэдрическими зернами; г) микропора - результат газовой продувки. Фото в отраженном свете.

Выделяются два типа пирита: первый - четкие ограненные кристаллы, второй - не имеет ярко выраженных форм (более поздние разновидности). Для пирита первого типа характерны классические кубические, октаэдрические, пентагондодекаэдрические формы кристаллов (рис. 5).

Диагностика минералов, ассоциирующих с пиритом, проводилась с помощью рентгеноспектрального с электронным зондом микроанализа (Camebax, Vega 3 Tescan). Достаточно уверенно диагностированы следующие минералы: кварц, ангидрит, каолинит, хлорит, галотрихит, пирит, сфалерит, галенит, рутил, гринокит (табл. 1).

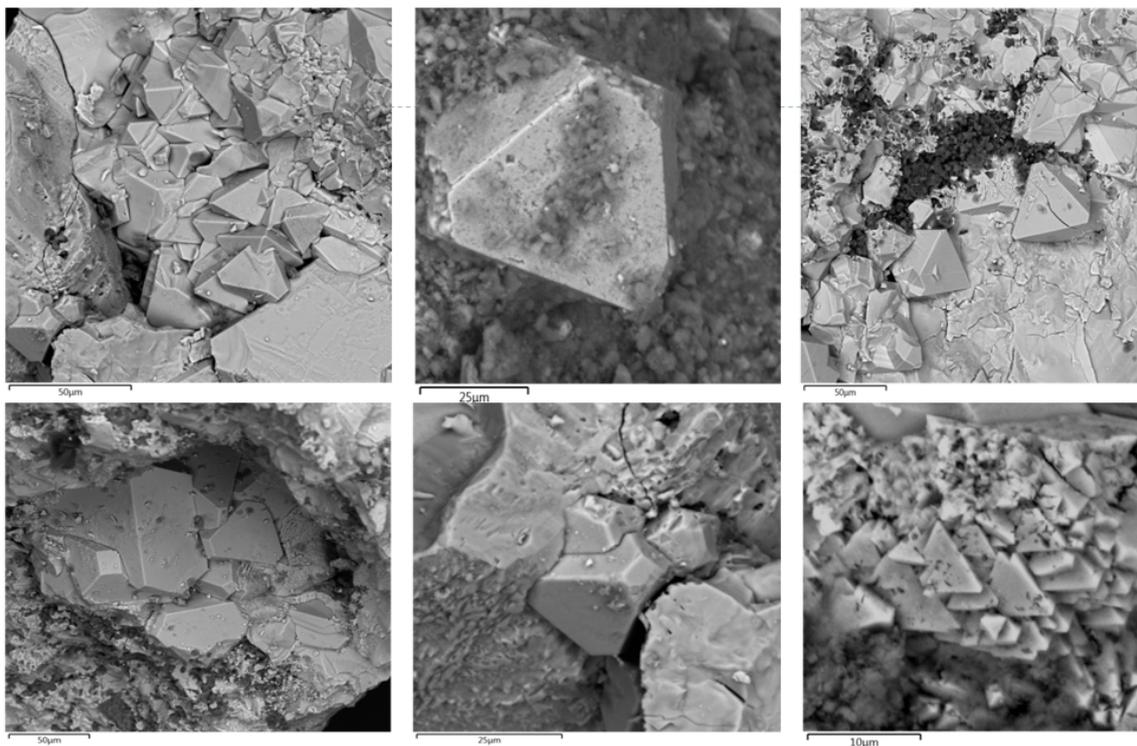


Рис. 5. Микроморфология агрегатов и единичных кристаллов пирита. Фото во вторичных электронах.

Таблица 1. Минеральный состав fumarольных образований.

№№	Минерал	Формула
1.	Кварц	$\text{SiO}_2$
2.	Ангидрит	$\text{CaSO}_4$
3.	Каолинит	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
4.	Хлорит	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$
5.	Галотрихит	$\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$
6.	Пирит	$\text{FeS}_2$
7.	Сфалерит	$\text{ZnS}$
8.	Галенит	$\text{PbS}$
9.	Рутил	$\text{TiO}_2$
10.	Гринокит	$\text{CdS}$

Изучение химического состава локальными методами физико-химического анализа показало, что пирит характеризуется однородным строением по составу, стехиометричен, то есть не содержит каких-либо элементов-примесей, на уровне чувствительности микронзондового анализа (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав пирита по данным рентгеноспектрального с электронным зондом микроанализа и сканирующей электронной микроскопии (вес. %, ат. %).

Вес.%	1	2	3	4	5	6
S	53.37	52.74	52.94	53.39	52.82	52.96
Fe	47.08	47.15	46.72	46.88	46.61	47.29
Сумма	100.45	99.89	99.66	100.27	99.43	100.25
Ат. %						
Fe*	66.38	66.08	66.37	66.48	66.37	66.11
S*	33.62	33.92	33.63	33.52	33.63	33.89

Примечание: Анализы выполнены в лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН на рентгеноспектральном с электронным зондом микроанализаторе Camebax, в комплекте с новейшим энерго-дисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80, \* - концентрации в ат. %

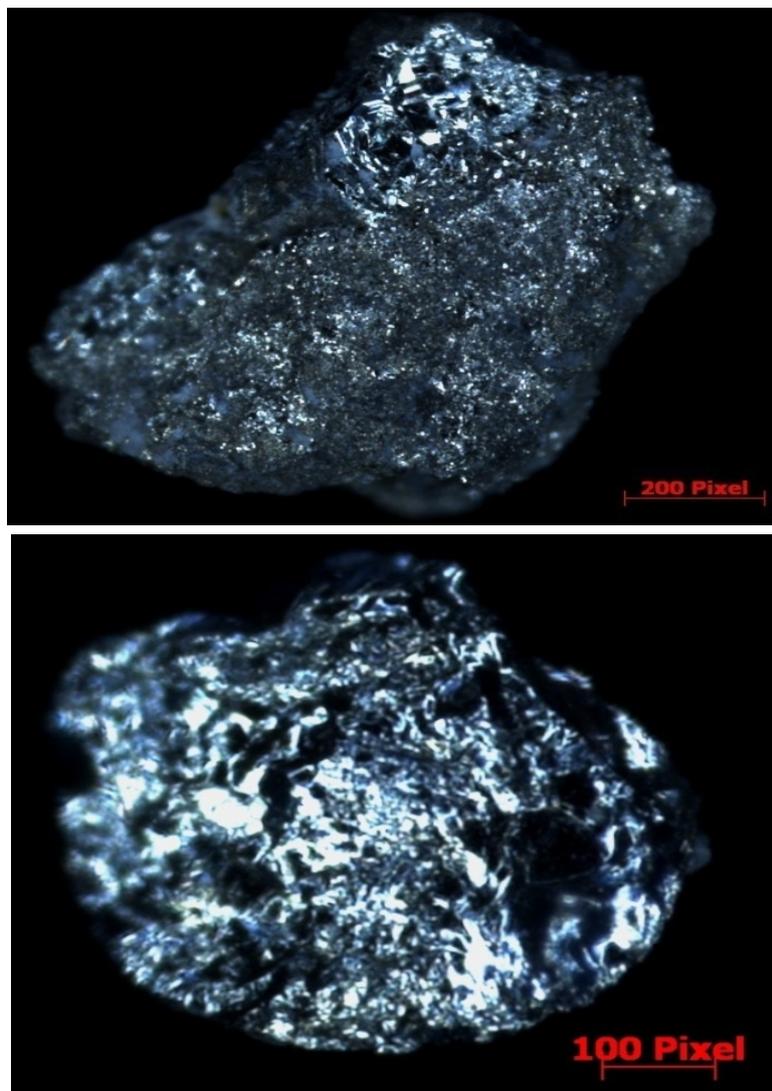


Рис. 6. Морфология агрегатов пирита из «монофракции», подготовленного для изучения методом ICP.

Для изучения распределения химических элементов, количество которых меняется в пределах от ppb до ppm, был применен метод масс-спектрометрии с использованием индукционно связанной плазмы. Для этих целей была отобрана «монофракция» пирита (рис. 6). Мы даем себе отчет, что как бы тщательно не производился отбор пирита - всегда на его гранях и внутри кристаллов будут присутствовать включения и других минералов. Поэтому об этом надо помнить при интерпретации результатов анализа.

Таблица 3. Химический состав пирита по данным масс-спектрометрического с индукционно связанной плазмой анализа (ICP).

Элементы минеральной ассоциации <sup>1</sup>	ppm	%	Изоморфная примесь <sup>2</sup>	ppm	%	Микро-включения минералов <sup>3</sup>	ppm	%
Na	743	0.0743	Se	188	0.0188	Zn	52.5	0.00525
Al	136	0.0136	Te	41.0	0.0041	Cu	61.2	0.00612
Ca	135	0.0135	As	34.8	0.00348	Pb	31.2	0.00312
Ti	91.8	0.00918	Co	5.4	0.00054	Tl	28.5	0.00285
Mn	30.3	0.00303	Ni	4.1	0.00041	Ba	4.2	0.00042
Cr	17.8	0.00178	Sb	2.2	0.00022	Ga	1.4	0.00014
Rb	4.4	0.00044	Hg	0.75	0.000075	Mo	1.1	0.00011
Sr	2.1	0.00021				Bi	0.33	0.000033
Sn	1.2	0.000012						
Nb	1.1	0.00011						
Cs	0.44	0.000044						
Cd	0.35	0.000035						
Y	0.17	0.000017						

Примечание: 1 - химические элементы минералов, с которыми ассоциирует пирит ("грязная монофракция" - физическая смесь пирита с другими минералами); 2 - предположительно входящие в структуру пирита; 3 - химические элементы твердых минеральных включений в пирите. Анализы выполнены в АСИЦ ИПТМ РАН (пгт. Черноголовка). Аналитик Карандашев В.К.

Впервые в пирите вулкана Папандайян обнаружено порядка 30 химических элементов - от Na до Y (табл. 3). Химические элементы были разделены на три группы. Элементы первой группы отнесены к минералам, ассоциирующим с пиритом, можно предположить, что высокие концентрации Al - каолинит, Ca - ангидрит, Ti - рутил. Вторая группа элементов - Se, Te, As, Co, Ni, Sb, Hg возможно изоморфно входят в структурную решетку пирита. Третья группа - твердые минеральные микровключения (галенит, сфалерит, халькопирит и т.д.). Такое многообразие химических элементов в пирите фумарольных ассоциаций вулкана Папандайян еще раз свидетельствует о том, что «минерал - структурное сито элементов. И это грязное сито» [2]. И это сито с одной стороны приносит нам информацию об условиях образования минерала, а с другой стороны подчеркивает, что понятие «монофракция» условно.

## ВЫВОДЫ

Типоморфные особенности пирита вулкана Папандайян сопоставимы с таковыми для пирита вулканов Камчатки (Мутновский, Горелый, Авачинский):

- он образует, как правило, рассеянную вкрапленность идиоморфных, гипидиоморфных зерен размером до 300 микрон и агрегаты в сростании с алунином, каолинитом, самородной серой, сульфатами типа галотрихита и ангидрита;

- убогий химический состав, как правило, стехиометричен и не обнаруживает признаков какой-либо химической неоднородности.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории вулканогенного рудообразования Чубарову В.М., Философовой Т.М. за возможность проведения аналитических работ; В.Ф. Лунькову, В.В. Куликову, С.В. Полушину за пробоподготовку каменного материала; научному руко-

водителю В.М. Округину за поставленную задачу и помощь в ее решении; профессору Розана Фатима Мега университета Пададжаран (Индонезия) за организацию работ на вулкане Папандайян.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, в рамках программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга» на 2012-2016 гг. и гранта ДВО (№ 14-III-B-08-053).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Типоморфизм минералов и его практическое значение, М.: Недра, 1972. с.236.
2. Шоу Д.М. Геохимия микроэлементов кристаллических пород. Л.: Недра. 1969. С. 208.
3. Hasanuddin Z. Abidin, H. Andreas, M. Gamal Ground deformation of Papandayan volcano before, during, and after the 2002 eruption as detected by GPS surveys // GPS solution. May 2006, Volume 10, Issue 2, pp 75-84.

## PYRITE OF THE VOLCANO PAPANDAYAN (INDONESIA)

***Zobenko O.A., Yablokova D.A., Chubarov M.V.***

Volcano Papandayan is on peninsula Java (Indonesia). Volcano Papandayan look like Mutnovskiy Volcano (South Kamchatka) due to structure, history of volcanic activity. There is intensive fumarolic activity with various deposition sublimates in craters. The authors have studied samples of "modified" processes fumarole activity volcanics. Kaolinite galotrihit, sulfur, anhydrite, chlorite were diagnosed. Particular attention is paid to pyrite. Mineralogical, geochemical and physico-chemical methods of research was able to study the micromorphology and chemical composition of pyrite volcano Papandayyan and associated minerals. By typomorphism features pyrite volcano Papandayyan detects similarities with pyrite Mutnovsky.

*Keywords: Pyrite, volcano Papandayan, Indonesia, typomorphism.*