



УДК 553.3/.4:553.2

В. М. Округин^{1,2}, Д. А. Яблокова^{1,2}, Е. Д. Андреева^{1,2},
К. О. Шишканова^{1,2}, В. М. Чубаров¹, Т. М. Философова¹,
С. В. Москалёва¹, И. И. Чернев³, М. В. Чубаров¹

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: okrugin@kscnet.ru

² Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,
Петропавловск-Камчатский, 683 032

³ ОАО «Геотерм», Петропавловск-Камчатский, 683 002

Новые данные о пирите современных и палеогидротермальных систем Камчатского края

Выявлена химическая неоднородность, обусловленная неравномерным распределением и локальным концентрированием таких химических элементов как As, Sb, Se, Te, Cu, Bi, Pb, Hg, Mn, Zn, Co, Ni. Спектр элементов-примесей пирита палеогидротермальных систем (эпитермальных вулканогенных месторождений) обнаруживает тесную связь с минералого-геохимическими особенностями среды образования. Предлагается использовать геохимическую неоднородность пирита для детальной геолого-генетической классификации, выявления скрытой минералого-геохимической зональности. Эти данные необходимы для оценки глубины эрозионного среза и степени перспективности как конкретных рудных объектов, так и металлогении зоны перехода континент-океан Камчатского края.

Введение

Пирит — один из самых распространённых рудных минералов Камчатского края. Он встречается во всех типах магматических, метаморфических и осадочных горных пород, отлагаясь в необычайно широком интервале температур, давлений и концентраций — от $C-P-T$ параметров магматических расплавов до условий современного литогенеза [2, 3, 5, 6, 9, 11, 12, 13]. По частоте встречаемости этот дисульфид железа не уступает таким каркасным и ленточным силикатам как полевые шпаты и пироксены, которые всесторонне и детально изучаются для решения как фундаментальных, так и прикладных проблем петрологии. Вполне естественно, что формируясь в таком уникальном интервале физико-химических условий, пирит обязан нести важную минералого-геохимическую информацию о среде своего образования. Поэтому изучение его типоморфных особенностей с применением самых разнообразных методов исследований было и остается в поле зрения минералогов, геохимиков, специалистов в области геологии и генезиса месторождений полезных ископаемых.

Пирит представляет собою один из наиболее важных минералов-индикаторов при изучении особенностей генезиса рудных месторождений. Знание его типоморфных особенностей имеет большое практическое значение для совершенствования теории локального прогноза, разработки наиболее эффективных поисковых критериев и прогнозных признаков.

Развитие и доступность методов локального физико-химического анализа (ЕМРА и аналитическая СЭМ) открыли новые возможности. На Камчатке сначала в ИВ (отдел физико-химических методов анализа и минералогии), а затем в ИВиС ДВО РАН (лаборатория вулканогенного рудообразования) в течение почти сорока лет проводится изучение типоморфных особенностей наиболее распространённых рудных (самородные металлы, сульфиды, сульфосоли) и жильных (кварц, карбонаты, цеолиты, адуляры) минералов месторождений, происхождение которых в той или иной степени связано с вулканической деятельностью. И пирит, конечно, на первом месте. В центре внимания весь доступный современной науке спектр физических и химических свойств минерала, а именно, количество, размеры, цвет, твердость, морфология (габитус), микроструктура, химический состав (стехиометричность), химическая неоднородность и её тип, микровключения и минералы, с которыми они ассоциируют.

Методы исследований

Изучение морфологии и микроструктуры, химического состава, особенностей распределения элементов-примесей пирита проводилось с использованием следующих методов: — классической минералогии и минераграфии (прецизионные автоматизированные микроскопы Axioskop 40, SteREO Discovery.V12, Carl Zeiss); — локального физико-химического анализа (рентгеноспектральный с электронным зондом микроанализатор Camebax, укомплектованный новейшим энергодисперсионным спек-

Таблица 1. Химический состав пирита современных гидротермальных систем (по данным рентгеноспектрального с электронным зондом анализа, вес. %)

	1	2	3	4	5	6	7
Fe	43,68	44,77	45,54	44,51	46,43	45,13	46,93
S	48,74	50,37	51,39	53,48	53,50	53,67	53,80
As	4,46	2,88	0,80	1,20	0,00	0,00	0,00
Hg	1,23	0,17	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00
сумма	98,10	98,19	98,93	99,19	99,93	98,80	100,73

Примечание: 1, 2 — Двухъярточная гидротермальная система; 3, 4 — Киреунская гидротермальная система; 5, 6, 7 — вулканы Авачинский, Мутновский, Горелый.

**Рис. 1.** Схема расположения объектов исследования.

тронном зондом Oxford Instruments X-max 80); — аналитической сканирующей электронной микроскопии (SEM Vega Tescan) в лабораториях ИВиС ДВО РАН, ИТиГ ДВО РАН, ИЭМ РАН, университетов гг. Гамбург, Бохум (Германия); Саппоро, Токио, Акита (Япония); Аделаида (Австралия).

Результаты исследований и их обсуждения

Изучение типоморфных особенностей пирита (морфология, состав, химическая неоднородность) современных гидротермальных систем показало, что пирит обнаруживает химическую неоднородность за счёт обогащения отдельных микрозон такими элементами как As, Mn, Au, Hg, Sb. Причём для

пирита Двухъярточной и Мутновской (в зонах вторичных изменений, связанных с геотермальными резервуарами) современных гидротермальных систем характерны округлые, овальные формы, так называемые сферолоиды (рис. 2 а, б, табл. 1). Сферолоиды Двухъярточной системы отличаются сложным внутренним строением. Среди наиболее распространённых элементов-примесей, обуславливающих неоднородное внутреннее строение, установлены аномальные концентрации мышьяка (который был также обнаружен и на Мутновской современной гидротермальной системе), ртути, сурьмы (рис. 3)[10].

Дисульфид железа fumarольных ассоциаций Мутновского, Горелого, Авачинского вулканов характеризуется примитивной микроструктурой и не содержит каких-либо элементов-примесей на уровне чувствительности микрозондового анализа ($n \cdot 10^{-2} \%$). Это, в основном, кристаллы кубического габитуса, стехиометричные по своему химическому составу.

Пирит палеогидротермальных рудообразующих систем (эпитермальные месторождения) Камчатки отличается наибольшим разнообразием морфологии (габитуса), микроструктуры, химического состава (однородность и неоднородность), микровключений и минеральных ассоциаций (табл. 2 и 3).

Для пирита таких систем характерны кристаллы пентагондодекаэдрического габитуса, а также кубического и октаэдрического облика. Они образуют как единичные кристаллы, так и дендриты, линзы, гнезда, прожилки (рис. 2 в, г, д, ж, з, е).

При изучении химической неоднородности основное внимание было уделено особенностям распределения элементов-примесей. В пиритах палеогидротермальных рудообразующих систем Камчатки выявлены следующие элементы-примеси: Mn, Cu, Pb, Bi, As, Se, Te, Sb. Пириты разных месторождений отличаются спектром и концентрациями этих элементов (табл. 3, 4, рис. 4).

Пирит Озерновского рудного поля образует гнезда, просечки размерами от 100 до 300 микрон, представленные кристаллами преимущественно сложных форм (пентагоны, октаэдры, кубооктаэдры). Он встречается в ассоциации с самородным золотом, халькопиритом, теллуридами, блеклыми рудами,

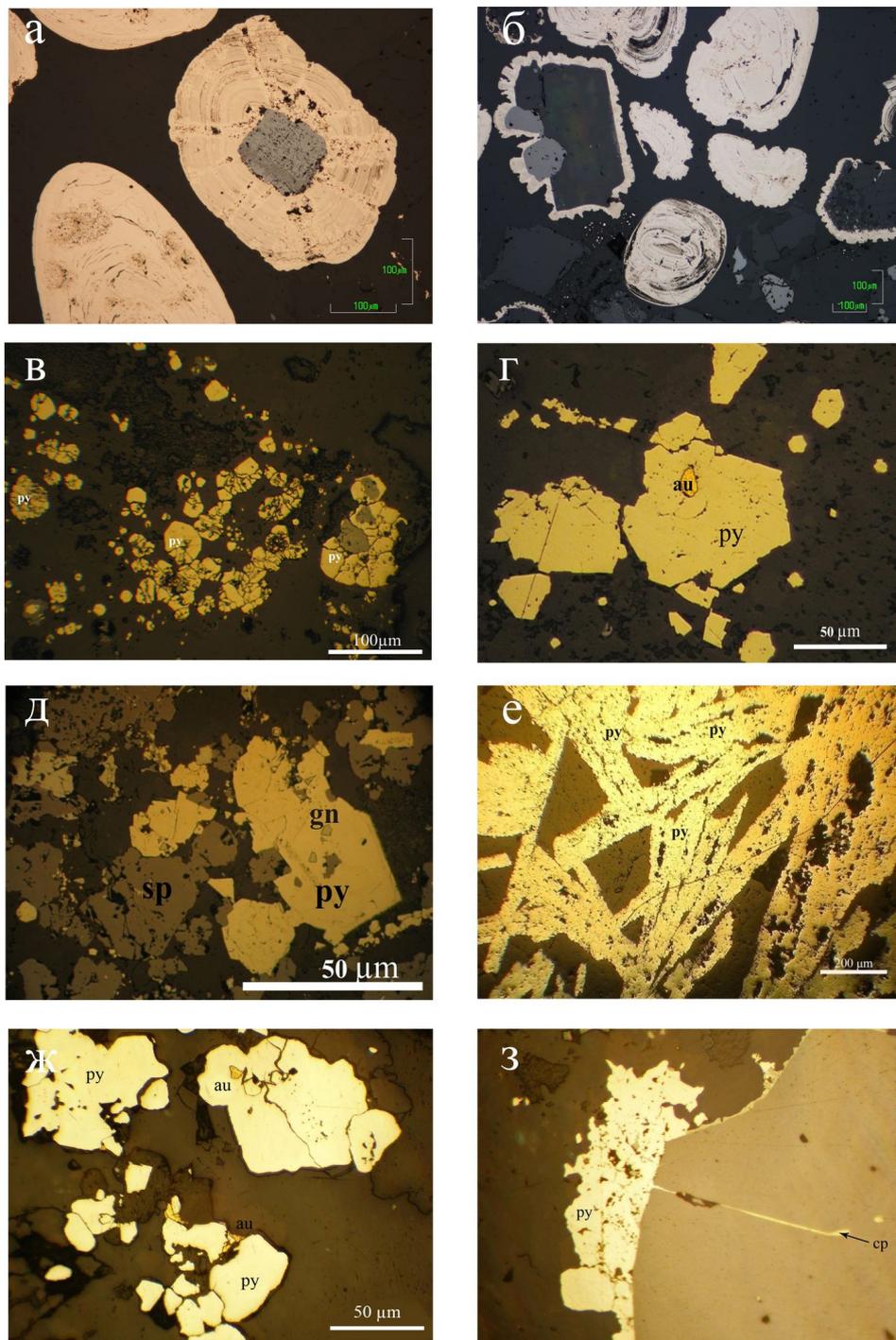


Рис. 2. Формы выделения пирита современных и палеогидротермальных систем: а, б — Двухъярточная система; в, г — Агинское, д, е — Мутновское, ж, з — Кумрочское эпitherмальные месторождения. Условные обозначения: *py* — пирит, *au* — золото, *sp* — сфалерит, *gn* — галенит, *cp* — халькопирит. Фото в отраженном свете.

Таблица 2. Типоморфные характеристики пирита эпitherмальных месторождений и рудопроявлений

Месторождение рудопроявление	Размер кристаллов (микрометр — μm)	Габитус или облик кристаллов	Формы выделения	Внутреннее строение	Элементы примеси (max, содержание в вес. %)	Ассоциации
Озерновское	1–300	пентагоны, октаэдрический, кубооктаэдрический, кубический	свободные кристаллы, гнёзда, просечки, металлоколлоидные, скелетные	неоднородное, зональное	Se (6,08), Te (3,73), Cu (1,23)	самородное золото, халькопирит, теллуриды, блеклые руды, рутил
Оганчинское	1–500	кубический, пентагон- додекаэдрический, призматический	единичные кристаллы, гнёзда, скелетные,	однородное	редко As (0,23)	халькопирит, блеклые руды, золото, сфалерит, галенит, сульфосоли, самородное золото
Агинское	2–50	кубический	свободные кристаллы	редко зональные по Cu	Cu (1,6)	самородное золото, халькопирит, редкие сращения с теллуридами и сульфидами
Кумроч	1–200	кубический, пентагон- додекаэдрический	свободные кристаллы, линзы, гнёзда, прожилки	неоднородное, зональное	As (6,79)	самородное золото, сфалерит, халькопирит
Родниковое	50–1000	кубический, призматический, пентагондодекаэдри- ческий	гнёзда, единичные кристаллы	неоднородное, зональное	As (1,78)	самородное золото, магнетит, стибнопирсеит, аргентит
Мутновское	20–500	кубический, призматический, пентагондодекаэдри- ческий,	линзы, гнёзда, прожилки, дендритовидные, перистые	неоднородное, зональное	As (4,42), Mn (1,93)	сфалерит, галенит, халькопирит, блеклые руды
Асачинское	50–500	пентагондодекаэдри- ческий, кубический, призматический	гнёзда, дендритовидные, металлоколлоидные, фрамбоидальные	неоднородное, зональное	As (4,57)	самородное золото, сфалерит, галенит, халькопирит, блеклые руды, сульфосоли серебра
Вилочинское	10–500	кубический, пентагон- додекаэдрический, призматический	отдельные кристаллы, единичные гнёзда, фрамбоидальные	неоднородное, зональное	As (4,31), Sb (2,62), Bi (0,21), Pb (3,88)	халькопирит, сфалерит, ковеллин, галенит

Таблица 3. Химический состав пирита палеогидротермальных систем (по данным рентгеноспектрального микроанализа, вес. %).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	43,43	45,85	44,78	45,98	47,37	46,67	46,26	44,71	48,30	46,77
S	50,37	52,38	52,10	51,11	51,69	50,08	52,07	49,59	50,63	49,86
As	6,79	2,28	1,78	1,75	1,21	2,72	1,26	4,57	1,10	1,93
сумма	100,59	100,51	98,66	98,84	100,27	99,47	99,59	98,87	100,03	98,56

Примечание: 1, 2 — месторождение Кумроч; 3, 4 — Родниковое месторождение; 5, 6 — Мутновское месторождение; 7, 8 — Асачинское месторождение; 9, 10 — Вилочинское рудопроявление

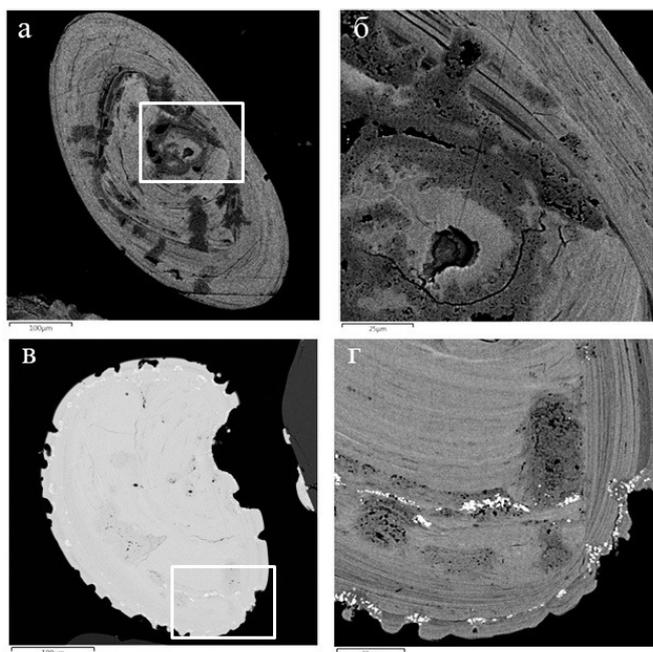


Рис. 3. Неоднородное зональное строение сферолоидов пирита современной гидротермальной системы Двухъягодная: а — светлые зоны — максимальные концентрации мышьяка, б — фрагмент «а»; в — общий вид, г — фрагмент «в», светло-серые микрозоны — тах. мышьяка, белые — тах. ртути. Фото в обратно рассеянных электронах.

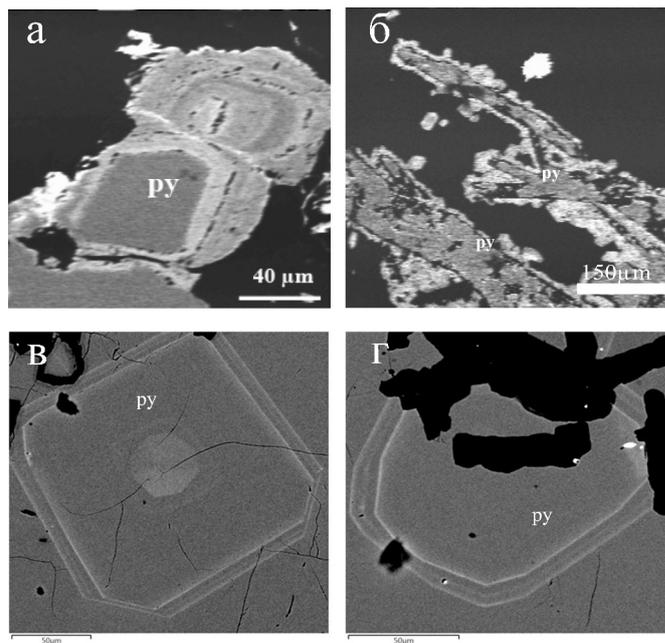


Рис. 4. Особенности внутреннего строения пирита эпитеермальных месторождений, обусловленные неоднородным распределением элементов-примесей (белые микрозоны): а, б — мышьяк (Асачинское месторождение), в, г — селен, теллур (Озерновское месторождение).

рутилом. По химическому составу пирит неоднороден за счет обогащения отдельных микрозон Se и Te, концентрации которых достигают 5–6 и 3–4 вес. %, соответственно (рис. 4в, г). Теллур присутствует также в виде микровключений.

В рудах Агинского месторождения пирит представлен кристаллами кубического, пентагон-додекаэдрического габитуса, образующими срастания до 100 микрон и более. Очень часто зёрна пирита катаклазированы и содержат включения позднего золота. Связанное самородное золото отличается разнообразием форм при очень мелких размерах (от 1–2 до 20 микрон, рис. 2 в, г). По химическому составу пирит стехиометричен, редко встречается химическая неоднородность, обусловленная неравномерным распределением меди. Скорее всего, это

связано тесной ассоциацией с халькопиритом и другими минералами меди.

Мышьяк — наиболее типичный для золоторудных эпитеермальных месторождений элемент-примесь. Например, в пиритах золото-серебряного месторождения Кумроч концентрации мышьяка достигают 6,79 вес. %. Пирит данного месторождения образует линзы, гнёзда размерами от 50 до 200 микрон, представленные кристаллами кубического, пентагондодекаэдрического габитуса. Для него характерны включения и срастания с самородным золотом, сфалеритом и халькопиритом (рис. 2ж, з).

Для руд Родникового месторождения содержание сульфидов, в том числе и пирита, редко превышает 5–25%. Обычно, он образует вкрапленность в зонах экзоконтактов жильных тел. В рудах количество

пирита резко уменьшается. Размеры единичных зёрен и агрегатов варьируют в широких пределах от 10 микрон до 0,5–1 см. Пирит имеет неоднородное строение, выраженное наличием микрозон, обогащённых мышьяком.

В рудах Мутновского золото-серебро-полиметаллического месторождения пирит один из основных рудных минералов. Он представлен единичными кристаллами кубического, реже пентагондодекаэдрического габитуса. Формы выделения его разнообразны от крупных массивных агрегатов до дендритов. Изучение дендритовидных форм выделения с помощью локального физико-химического анализа позволило обнаружить неоднородное строение пирита за счёт такого элемента-примеси как мышьяк (до 4,51 вес. %). Наблюдается мозаично-субблоковое строение, обусловленное обогащением не только мышьяком, но и марганцем.

Пирит Асачинского золото-серебряного месторождения имеет определённые сходства с пиритом Мутновского месторождения, а именно: дендритовидные формы выделения (рис. 4б); неоднородное химическое строение, обусловленное наличием мышьяка (рис. 4а).

Таким образом, типоморфные особенности пирита: — индикатор среды минерало-рудобразования; — необходимый элемент детальной геолого-генетической классификации; — выявления скрытой минералого-геохимической зональности. Знание этих особенностей может быть использовано для оценки степени эродированности рудных тел и перспективности рудных объектов Северо-Западной части зоны перехода континент — океан.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (программа стратегического развития ФГБОУ ВПО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга» на 2012–2016 гг.) и проекта ДВО РАН (№ 14-III-08-053, 14-III-B-08-192).

Список литературы

1. Андреева Е. Д., Округин В. М., Матсуеда Х., Оно Ш., Такахаши Р. Особенности формирования рудных тел Агинского месторождения, Центральная Камчатка // Материалы XXI Международной конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения академика Смирнова В. И. «Фундаментальные проблемы геологии месторождения и металлогении». Москва, 2010. С. 15–17.
2. Бородав Б. С., Мозгова Н. Н. Об изоморфном замещении серы в пирите мышьяком и сурьмой // Минералы и парагенезисы минералов гидротермальных месторождений. Л.: Наука. 1974. С. 3–13.
3. Дир У. А., Хаун Р. А., Зусман Дж. Пирит. Породообразующие минералы. М: Мир. 1966. Том. 5. С. 148–165.
4. Князев Г. И., Куделя В. К. Полупроводниковые свойства галенитов и пиритов как критерий условий рудообразования. Изд-во «Наука думка». Киев. 1969. 115 с.
5. Коробейников А. Ф., Нарсеев В. А., Пшеничкин А. Я., Ревякин П. С., Арифюлов Ч. Х. Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение). ЦНИГРИ. М. 1993. 213 с.
6. Моисеева М. И., Михайлова Ю. В. Пирит. В кн «Минералы Узбекистана», т. I, Ташкент, 1975.
7. Озерова Н. А., Бородав Ю. С., Кирсанова Т. П., Дмитриева М. Т., Вяльсов Л. Н. Ртутьсодержащий пирит из Двухюрточных термальных источников на Камчатке // Геология рудных месторождений. 1970. Том. 12. № 1. С. 73–78.
8. Округин В. М. Особенности эпитепального минералообразования в областях активного вулканизма // Современное минералообразование вулканических областей. Тезисы докладов выездной сессии Всесоюзного минералогического общества. П-К, 1989. С. 27–29.
9. Округин В. М., Ананьев В. В., Полушин С. В., Самойлов Н. И., Соколов В. Н., Степанов И. И., Философова Т. М., Чубаров В. М., Шувалов Р. А. Некоторые особенности минералов сульфидной ассоциации кайнозойских вулканических Камчатки // Современное минералообразование вулканических областей. Тезисы докладов выездной сессии Всесоюзного минералогического общества. П-К, 1989. С. 25–27.
10. Округин В. М., Яблокова Д. А. Сравнительный анализ сульфидных сферолоидов золотоносных конгломератов Витватерсранда (ЮАР) и современных гидротермальных систем Камчатки // Вестник КРАУНЦ. № 2 (22), 2013. С. 196–204.
11. Петренко И. Д. Золото-серебряная формация Камчатки. ВСЕГЕИ, 1999. С. 116.
12. Прохоров В. Г. Пирит (к геохимии, минералогии, экономике и промышленному использованию) // Тр. СНИИГГИМС. Вып. 102. Красноярск. 1970. С. 188.
13. Сахарова М. С. Типоморфные особенности состава пирита золото-сульфидных месторождений. «Новые данные о минералах СССР». Труды минер. музея им. Ферсмана А. Е., вып. 18, 1968.
14. Типоморфизм кварца, пирита и золота золоторудных месторождений Узбекистана. Коллектив. Ташкент, Изд-во «Фан» УзССР, 1981. — 144 с.
15. Okrugin V. M., Okrugin A. M., Polushin S. V., Chubarov V. M. Sulphides of contemporary land and submarine hydrothermal systems of Kamchatka // Mineralogical magazine. Vol. 58 A. 1994.
16. Okrugin V. M., Zelensky M. E. Miocene to quaternary center of volcanic, hydrothermal and ore forming activity in the Southern Kamchatka // Metallogeny of the Pacific Northwest, 2004. V1-k, P. 147–174.