

УДК 553.078.2+553.21/24

©1998 г. РЫЧАГОВ С.Н., САНДИМИРОВА Е.И., СТЕПАНОВ И.И.

ПИРИТ КАК ИНДИКАТОР СТРУКТУРЫ СОВРЕМЕННОЙ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
И ПРОБЛЕМА ИСТОЧНИКА РУДНОГО ВЕЩЕСТВА

Проанализированы состав примесей и распределение морфологических параметров пирита метасоматитов современных высокотемпературных гидротермальных систем Баранского (о-в Итуруп) и Паужетской (Южная Камчатка). Установлено, что пирит, образующий рассеянную вкрапленность в измененных породах гидротермальной системы, содержит микропримеси многих рудных и нерудных элементов - Au, Ag, As, Sb, Hg, Pb, Cu, Mn, Mg, Mo, V, Co, Ni, Zr, Li, Al и др. в количестве от 0,00001 до 3,2%, что согласуется с составом современных глубинных гидротермальных растворов. Содержание микропримесей в пирите остывающей Паужетской гидротермальной системы (температуры растворов не превышают 220° С) в целом на порядок выше, чем в гидротермальной системе Баранского, находящейся на этапе прогрессивного развития (температуры растворов в недрах системы достигают 350° С). Эта тенденция подтверждается на примере низкотемпературной (до 110° С) Паратунской гидротермальной системы (Южная Камчатка), где содержание тех же микрокомпонентов в пирите метасоматитов еще выше. Зоны восходящего и нисходящего потоков гидротерм различаются составом микропримесей в пирите. Резким уменьшением количества микропримесей характеризуются внутренние части мощных зон перехода жидкость - пар, на границах которых, наоборот, формируются геохимические барьеры и накапливаются Au, Ag, As, Sb, Hg и др. в пирите и во вмещающих кварц-адуляровых (кварц-адуляр-пренит-вайра-китовых с эпидотом) метасоматитах. Крупные зоны кипения гидротермального флюида отличаются от других гидрогеологических структур и характером распределения морфологических параметров пирита. Источниками некоторых рудных и нерудных компонентов в высокотемпературной гидротермальной системе могут быть: предполагаемый на глубинах >2,0 км периферический магматический очаг или производное от него крупное остывающее субинтрузивное тело диоритов, кровля которого вскрыта бурением и изучена комплексом методов.

PYRITE AS AN INDICATOR OF PRESENT-DAY HIGH-TEMPERATURE HYDROTHERMAL SYSTEMS AND THE ORIGIN OF ORE MATERIAL, by R y c h a g o v S. N. , S a n d i m i r o v a E. I. and S t e p a n o v I. I. The composition of admixtures and the distribution of morphologic parameters in the pyrite found in metasomatites of present-day high-temperature hydrothermal systems, Baranskii on Iturup I. and Pauzhetka, southern Kamchatka have been studied. The pyrite which is found as diffuse impregnations in altered rocks of the hydrothermal system contains microscopic admixtures of many ore-forming and other elements like Au, Ag, As, Sb, Hg, Cu, Mn, Mg, Mo, V, Ni, Zr, Li, Al etc. in concentrations of 0.00001 to 3,2%, which is consistent with the composition of present-day deep-seated hydrothermal brines. The concentration of trace contaminants in the pyrite of the cooling Pauzhetka hydrothermal system (the brine temperatures being within 220° C) is generally an order higher than those in the Baranskii hydrothermal system, which is in the phase of progressive evolution, the brine temperatures reaching 350° C in the interior of the system. The trend referred to above is corroborated by the cooler (within 110° C) Paratunka hydrothermal system, southern Kamchatka where the concentrations of the same trace components in metasomatite pyrites are still higher. The zones of upwelling and downwelling flows differ in the composition of trace contaminants in the pyrite. Much lower amounts of trace contaminants characterize the interior parts of thick fluid-steam transition zones, while it is at the boundaries of these that geochemical barriers arise and Au, Ag, As, Sb, Hg etc. are accumulating in pyrite and host quartz-adular (quartz-adular-prehnite-wairakie with epidote) somatites.

Large zones where the hydrothermal fluid is boiling differ from other hydrogeologic features in the distribution of pyrite morphologic parameters as well. The origin of some ore-forming and other components in a high-temperature hydrothermal system may be: a peripheral magma chamber or a large cooling subintrusive diorite body derived from this; it is supposed to lie at depths below 2 km, the top of the body having been penetrated by drilling and studied by several techniques.

(Received October 10, 1995)

Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

Пирит гидротермальных рудных месторождений как один из основных рудо-образующих минералов описан в большом количестве работ. Пирит в современных гидротермальных системах отлагается на всех стадиях развития систем, поэтому многие исследователи считают его малоинформативным. Неоднократные попытки оценить те или другие свойства пирита для решения генетических вопросов современного вулканогенного рудообразования, как правило, заключались лишь в определении состава и структуры минерала. Тем не менее выполнено много определений содержания Au, Ag, As, Sb и других элементов в сульфидах ряда геотермальных проявлений Камчатки и Курильских о-вов [10, 13, 27]. Проведенные авторами настоящей работы исследования показали, что особенности морфологии, состава включений и распределения пирита отражают изменение термодинамических параметров и состав эндогенного флюида, а также структурную обстановку в недрах изученных современных гидротермальных систем Камчатки и Курильских о-вов.

Современные высокотемпературные гидротермальные системы Баранского (о-в Итуруп) и Паужетская (Южная Камчатка), на примере которых выполнена настоящая работа, а также низкотемпературная Паратунская (Южная Камчатка), данные по которой приведены для сравнения, - одни из наиболее хорошо изученных гидротермальных систем Курило-Камчатского региона. Ранее рассмотрены различные стороны геологических, гидрогеологических, геохимических и других процессов, происходящих в недрах гидротермальных систем [3, 4, 8, 9, 12, 14-16, 25]. Интерес представляет также рудообразование на поверхностных, субповерхностных и глубинных геохимических барьерах, имеющее место как в данных, так и в других молодых системах Камчатки и Курильских о-вов [6, 11, 13, 24]. Определенный интерес к минералорудообразованию в недрах современных гидротермальных систем как возможному аналогу процессов, происходящих на начальных этапах формирования эпитермальных золотосульфидных месторождений, инициирован в связи с исследованием рудных и силикатных магнитных шариков [13, 19, 22].

Пирит выделен из всех типов пород и гидротермальных новообразований: высоко-, средне- и низкотемпературных пропиллитов, аргиллизированных пропиллитов, термальных глин и рудных осадков из грязевых котлов. Морфология пирита изучена с помощью метода минералогического анализа, состав примесей определен на рентгеновском микроанализаторе Camebax и атомным эмиссионным оптическим спектральным методом испарения из канала угольного электрода с визуальной интерпретацией (дифракционный спектрограф PGS-2), содержание ртути - на атомно-флуоресцентном фотометре "Меркурий ЗМ" с пределом обнаружения $5 \cdot 10^{-7}\%$ (все - в Институте вулканологии ДВО РАН); содержания золота определены также атомно-абсорбционным методом с предварительной экстракцией его нефтяными сульфидами с использованием графитового анализатора HGA-74 на спектрометре Perkin-Elmer-503 (предел обнаружения 0,2 мг/т) в Институте геохимии СО РАН.

Состав микропримесей в пирите. Исследованный пирит имеет гидротермально-метасоматическое происхождение. Он образует рассеянную вкрапленность во всех типах пропиллитов и аргиллизированных разностях пород, а также скопления кристаллов в термальных глинах и осадках в грязевых котлах. Максимальное количество пирита образуется в так называемых "синих" глинах в пределах зоны серно-кис-лотного выщелачивания (опал-каолинит-алунитовые метасоматиты) на интервале

**Содержание микропримесей (%) в пирите метасоматитов
гидротермальной системы Баранского, по разрезу
скважин 55, 64, 65 и 72**

Элемент	55-11	55-3	64-20	64-26	65-38	65-45	72-10	72-15
	Глубина отбора образца, м							
	330	150	440	770	540	960	110	370
As	0,025	0,02	0,03	0,04	0,045	0,05	Н/о	
		(0,022)		(0,035)		(0,047)		
Mn	0,11	0,17	0,084	0,12	0,008	0,1	0,12	0,16
		(0,14)		(0,102)		(0,054)		(0,14)
Pb	0,0018	0,0023	0,0033	0,0044	0,0022	0,0037	0,0015	0,001
		(0,0020)		(0,0039)		(0,003)		(0,012)
Mo	0,00023	0,00028	0,00022	0,0002	0,00022	0,00023	0,00021	0,00027
		(0,00025)		(0,00021)		(0,00022)		(0,00024)
V	0,0064	0,0048	0,0026	0,0047	0,0062	0,004	0,0027	0,0031
		(0,0056)		(0,0036)		(0,0051)		(0,0029)
Cu	0,0086	0,0084	0,0086	0,0088	0,0007	0,0076	0,0042	0,005
		(0,0085)		(0,0087)		(0,0042)		(0,0046)
Ag	0,0003	0,0002	0,00045	0,0005	0,00045	0,0004	0,00028	0,00025
		(0,00025)		(0,00048)		(0,00042)		(0,00027)
Co	0,0015	0,0074	0,0015	0,0016	0,0015	0,0009	0,0019	0,0015
		(0,0045)		(0,0015)		(0,0012)		(0,0017)
Ni	0,0035	0,005	0,0025	0,003	0,0015	0,002		Н/о
		(0,0042)		(0,0028)		(0,0018)		
Zr	0,0047	0,008	0,0042	0,0043	0,0074	0,0042	0,006	0,007
		(0,0063)		(0,0042)		(0,0058)		(0,0065)
Mg	0,028	0,025	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,035
		(0,026)		(0,040)		(0,045)		(0,027)
Si	0,03	0,02	0,025	0,04	0,05	0,03	0,023	0,024
		(0,025)		(0,032)		(0,040)		(0,023)
Al	0,035	0,04	0,03	0,045	0,025	0,05	0,02	0,03
		(0,037)		(0,037)		(0,037)		(0,025)

Примечание. Данные получены спектральным методом в ИВ ДВО РАН, аналитик Н.И. Чеброва; 55-11-72-15 - номера образцов; указаны конкретные значения анализов, в скобках - среднее содержание, %; Н/о — не обнаружено.

0-100 м (система Баранского) и 0-2 м (Паужетка) от дневной поверхности и на глубине более 500-900 м в кварц-эпидозитах (монокварцитах). Кровля зоны кварц-эпидозитов находится на различной глубине в связи с блоковым строением гидротермальных систем: на 500 м и ниже в горстах и на 900 м и ниже - в пределах опущенных блоков.

Пирит содержит микропримеси всех 13 химических элементов, включенных в спектральный анализ, на уровне от 0,00001 до 0,17% (табл.1)¹. Очевидно, что спектр химических элементов, содержащихся в качестве микропримеси в пирите, на самом деле значительно шире. Согласно анализу пирита гидротермальной системы Баранского на микрозонде Camebax, максимальные содержания в микровключениях

¹ В приведенных данных не подлежат сомнению относительные изменения содержаний всех указанных элементов. Абсолютные уровни измеренных концентраций могут подвергнуться некоторой коррекции, поскольку авторы не располагали стандартными образцами, полностью адекватными анализируемым пиритам.

**Содержание ртути в пирите гидротермальных систем
Баранского (№ 1-39) и Паужетской (№ 40-56)**

№ п.п.	Номер пробы	Глубина отбора, м	Породы, из которых выделен пирит	C·10 ⁶ , %
1	54-36	390	Песчаник грубозернистый	Н/о
2	54-40	430	Аргиллит цеолитизированный	25
3	54-47-2	550	Туфоконгломерат трещиноватый	14
4	54-55	650	Туф пестроцветный, пропилитизированный	100
5	54-86	750	То же, аргиллизированный	108
6	54-57	780	То же, трещиноватый	25
7	54-63	890	То же, окварцованный	20
8	54-65	930	То же, крупнопористый	21
9	54-67	1040	Кварц-эпидозит массивный	18
10	54-72	1120	То же	15
11	54-76	1180	"	18
12	55-2	140	Туф аргиллизированный	150
13	55-4	190	Туф окварцованный	14
14	55-6	220	Туф пропилитизированный пористый	11
15	55-7	250	То же, трещиноватый рыхлый	23
16	55-8	300	То же, более плотный	16
17	55-9	350	Андезиты с прожилками сульфидов	150
18	55-10	300	Туф пропилитизированный	18
19	55-11	330	То же	48
20	55-12	360	"	30
21	55-13	380	"	49
22	64-13	50	Туф пропилитизированный	33
23	64-15	140	То же	30
24	64-16	200	"	30
25	64-17	240	"	54
26	64-19	370	"	33
27	64-22	530	"	33
28	64-25	740	"	11
29	65-31	120	Туф аргиллизированный	190
30	65-32	180	Туф пропилитизированный	Н/о
31	65-33	250	То же	20
32	65-34	320	"	10
33	65-35	380	"	33
34	65-40	630	Туф псаммитовый пропилитизированный	33
35	65-41	680	Туфоконгломерат пропилитизированный	16
36	72-11	150	Туф агломератовый пропилитизированный	21
37	72-12	220	То же, интенсивно изменен	320
38	72-13	270	Туф агломератовый пропилитизированный	33
39	72-14	320	То же, аргиллизированный	1200
40	2/501-1	0-0,2	Опал-алунит-каолинистая глина	2500
41	2/501-2	0,2-0,4	Каолинит-монтмориллонитовая глина	700
42	2/501-3	0,4-0,6	Аргиллизированный гравий	110
43	2/502-2	0,1	"Синие" глины	900
44	2/506-1	0	Каолинит с пиритом	1400
45	2/506/2	0	То же	2000
46	2/507-1	0-0,3	Опал-алунит-каолинистая глина	170
47	2/507-2	0,3-0,6	"Синие" глины	3300
48	2/508-1	0	То же	3000
49	2/508-2	0,3	Аргиллизированный гравий	350
50	2/601	0	Осадок на дне грязевого котла	9000
51	2/602	0	То же	11 000

Таблица 2 (окончание)

№ п.п.	Номер пробы	Глубина отбора, м	Породы, из которых выделен пирит	C- 10 ⁻⁶ , %
52	2/603-1	0-0,2	Каолинистая глина	3200
53	2/603-2	0,2-0,4	"Синие" глины	1800
54	2/603-3	0,4-0,6	То же, больше опала, халцедона	1100
55	2/604	0	Каолинит-монтмориллонитовая глина	160
56	2/605	0-0,4	"Синие" глины	790

Примечание. Данные получены на атомно-флюоресцентном фотометре "Меркурий 3М" в ИВ ДВО РАН, аналитик Н.И. Чеброва.

составляют: Au - до 0,01...0,22, Ag - 0,01...0,05, As - 0,02...3,2, Pb - 0,01...0,24, Cu - 0,01...0,51, Zn - 0,01...0,04%. Содержание многих элементов-примесей (V, Co, Ni, Cu, Hg и др.) в валовых пробах пирита Паужетской гидротермальной системы в среднем выше на порядок [13] (см. табл. 1).

Распределение ртути несколько иное. Так, пирит метасоматитов всех разрезов гидротермальной системы Баранского содержит ртуть на уровне от (20-100) · 10⁻⁶ до 1200 · 10⁻⁶%, а пирит аргиллизитов, "синих" глин, рудных илистых осадков на дне грязевых котлов Паужетской гидротермальной системы - до 11 000 · 10⁻⁶% (табл. 2). Пирит поверхностных образований из зоны серно-кислотного выщелачивания Паужетской гидротермальной системы содержит Hg в среднем на порядок выше, чем пирит этой зоны Баранского. Наоборот, породы и сульфиды вертикальных разрезов (2-1000 м) Паужетки практически лишены ртути [26], в то время как породы системы Баранского до глубины 1500 м, а вероятно, и ниже, отличаются аномально высокими для геотермальных систем содержаниями - на 1-2 порядка выше фоновых [23]. Отмечена также тенденция некоторого увеличения содержания ртути в пирите системы Баранского к нижним горизонтам системы (в кварц-эпидозитах, насыщенных метасоматическим пиритом). В целом содержание ртути в пирите возрастает от слабопропилитизированных и плотных пород к аргиллизированным рыхлым и трещиноватым пропилитам, а в зоне кислотного выщелачивания — снизу вверх от монтмориллонитовых к каолинистым и "синим" глинам.

Особенности распределения элементов-примесей в пирите (согласно геологической структуре гидротермальной системы Баранского). Проанализировано поведение микропримесей в пирите в двух случаях, принципиально различающихся своими термодинамическими параметрами [18]: в разрезе опущенного блока или в зоне питания гидротермальной системы (скв. 55) и в разрезе горста или в зоне восходящего высокотемпературного теплового потока (скв. 64 и 65, рис. 1). Скважина 72 пробурена в краевой части горста в обстановке "задавливания" термальных вод метеорными в верхних горизонтах гидротермальной системы (глубина скв. 72 составляет 400 м), что по многим термодинамическим и гидрохимическим параметрам соответствует таковым опущенного блока.

На рис. 1 видно, что область восходящего потока гидротерм четко отличается от зоны питания распределением элементов-примесей в пирите. При этом поведение элементов в пирите разрезов скв. 64 и 65 фактически идентично, что подтверждает объективный характер их распределения в пределах области восходящего потока и в целом в геотермальном месторождении. Разрезы скв. 55 и 72 коррелируют между собой по восьми химическим элементам из 13, что может указывать на близость геохимической обстановки в зоне питания гидротермальной системы и верхней краевой части горста. Однако распределения элементов-примесей в пирите на этих участках гидротермальной системы существенно отличаются друг от друга. В целом пирит метасоматитов в зоне восходящего потока гидротерм "обогашен" As, Pb, Ag, Mg, Si, Al, а также, возможно, Cu, V и некоторыми другими элементами; в зоне нисходящего потока - Mn, Mo, Co, Ni, Zr, Al.

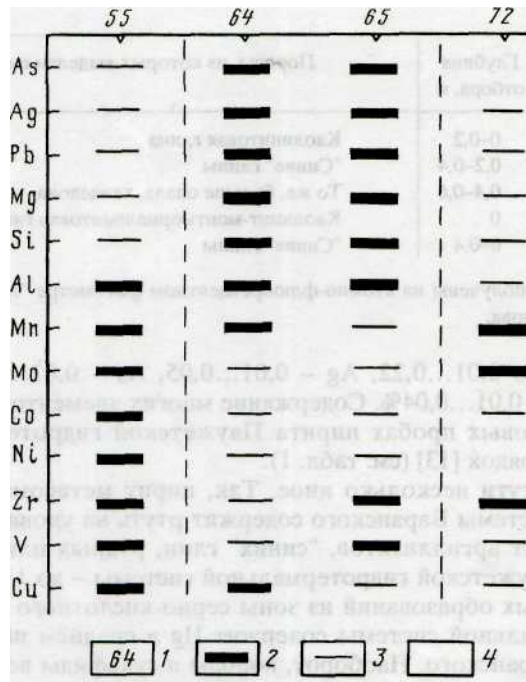


Рис. 1. Распределение микропримесей в пирите метасоматитов гидротермальной системы Баранского по данным спектрального анализа: /-номер скважины; 2, 3 - соответственно относительно высокое и относительно низкое (отличающееся от первого в 2 и более раза) содержание элементов; 4 - элемента не обнаружено. Вертикальными линиями разделены разрезы геологических блоков (см. текст)

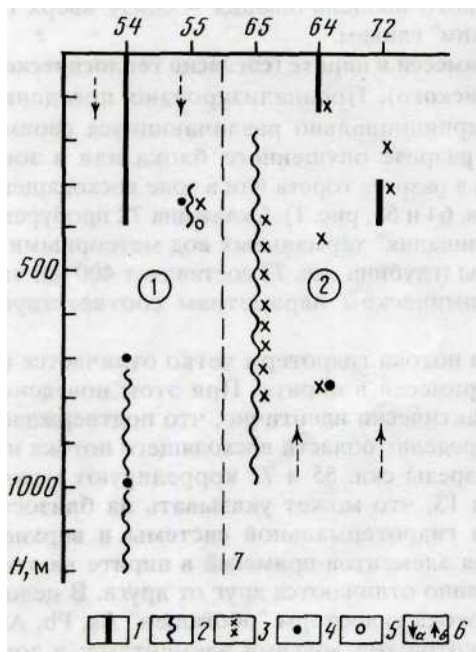


Рис. 2. Распределение микропримесей в пирите метасоматитов в вертикальных разрезах гидротермальной системы Баранского по данным микро-зондового анализа: 7-5 - распределение микрокомпонентов в пирите (1 - Au, 2 - Pb, 3 - As, 4 - Si, 5 - Zn); 6 - преобладающее направление движения вод (а - нисходящее, б - восходящее); 7 - линия разделения разрезов блоков: 1 - относительно опущенного (скв. 54 и 55), 2 - горста (скв. 65, 64 и 72)

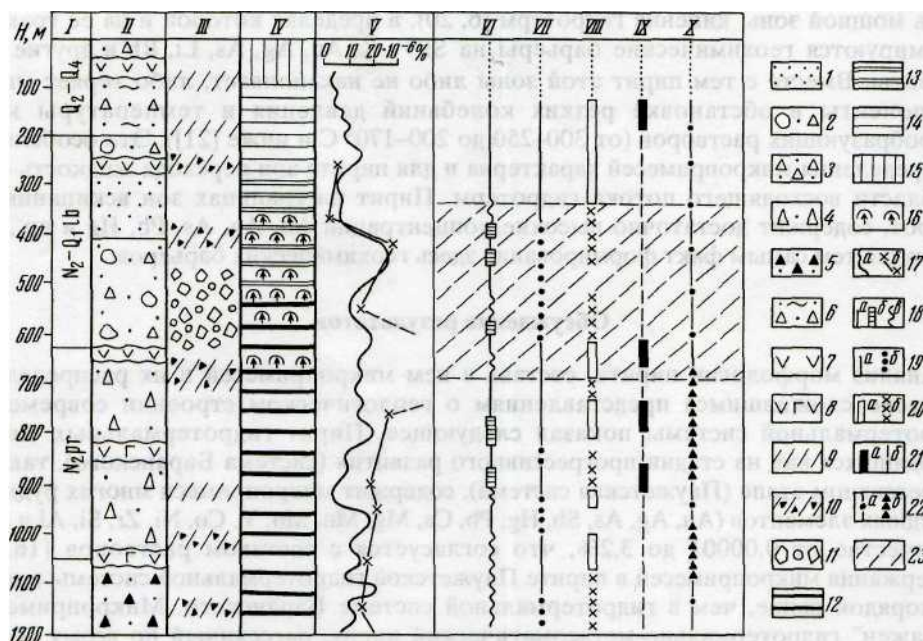


Рис. 3. Распределение морфологических характеристик пирита в метасоматитах разреза скв. 54: I - Возраст отложений (рп - парусная свита, lb - Лебединская), II - литология, III - тектоническая структура, IV - гидротермальные изменения, V - распределение ртути по разрезу, VI-X - морфологические характеристики и цвет пирита; 1 - туфоалевролиты и туфопесчаники, 2 - туфоконгломераты, 3 - туфы псаммитовые, 4 - туфы псефитовые, 5 - туфы интрузивные (интрузивные или автомагматические брекчии), 6 - игнимбриты, 7, 8 - лавы, дайки, силлы андезитов и андезитобазальтов соответственно; 9 - зоны трещиноватости; 10, 11 - соответственно тектонические и гидротермальные брекчии; 12-14 - пропилиты соответственно высоко-, средне- и низкотемпературные; 15 - метасоматиты зоны кислотного выщелачивания; 16 - зона перехода жидкость - пар; 17 - распределение ртути (а - во вмещающих породах, б - в пирите); 18 - преобладающая форма зерен пирита (а - агрегатная, б - кристаллическая, в - смешанная); 19 - размер зерен (а - 0,1 ... 1,0, б - 0,1 ... 1,6 мм); 20 - преобладающий габитус («кубический, б - пентагондодэкаэдрический»); 21 - преобладающая форма агрегатов (а-массивно-зернистые, б- сростки кристаллов); 22 - цвет (а - ярко-желтый, б- желтый с синей и малиновой побегалостью); 23 - участок разреза, отличающийся характером распределения морфометрических параметров пирита (см. текст)

Золото характерно как микропримесь в пирите для верхних горизонтов гидротермальной системы (рис. 2), где его содержание достигает 0,22%. Наиболее значимы содержания и устойчиво распределение свинца в нижней части опущенного блока и в пределах всего разреза горста. Мышька характерен для средней и верхней частей разреза горста (0-800 м) и отмечен только в одном зерне пирита в опущенном блоке. Зафиксированы также на различных глубинах отдельные, но значимые по содержанию (до 0,5%) включения Си.

Обращает на себя внимание резкое уменьшение содержаний микропримесей в пирите метасоматитов опущенного блока на интервале 400-700 м, кроме ртути, содержание которой в нижней части интервала, наоборот, резко возрастает (см. табл. 2). Пирит этого интервала отчетливо выделяется и своими морфометрическими параметрами - частым чередованием форм зерен, их размеров, габитусом кристаллов (рис. 3). Согласно геологическому строению [18], к этому интервалу приурочена граница двух стратиграфических толщ - вулканогенной парусной свиты и вулканогенно-осадочной лебединской. Породы интервала интенсивно трещиноваты и брекчированы и полностью замещены агрегатом кварц-адулярового и кварц-адуляр-пренит-вайрацитового состава с эпидотом. Это свидетельствует о существовании

здесь мощной зоны кипения гидротерм [6, 20], в пределах которой и на ее границах формируются геохимические барьеры на SiO_2 , K, Au, Ag, As, Li, Rb и другие компоненты. Вместе с тем пирит этой зоны либо не накапливает, либо теряет микрокомпоненты в обстановке резких колебаний давления и температуры минералообразующих растворов (от 300-250 до 200-170° С и ниже [21]). Эта особенность распределения микропримесей характерна и для пирита зон перехода жидкость - пар в области восходящего потока гидротерм. Пирит на границах зон вскипания, наоборот, содержит достаточно высокие концентрации Au, Ag, As, Pb, Hg и др., подтверждая тем самым факт формирования здесь геохимических барьеров.

Обсуждение результатов

Анализ морфологии пирита, состава в нем микропримесей и их распределения согласно сложившимся представлениям о геологическом строении современной гидротермальной системы показал следующее. Пирит гидротермальных систем, находящихся как на стадии прогрессивного развития (система Баранского), так и на регрессивном этапе (Паужетская система), содержит микропримеси многих рудных и нерудных элементов (Au, Ag, As, Sb, Hg, Pb, Ca, Mg, Mn, Mo, V, Co, Ni, Zr, Si, Al и др.) в количестве от 0,00001 до 3,2%, что согласуется с составом растворов [16, 17]. Содержания микропримесей в пирите Паужетской гидротермальной системы в целом на порядок выше, чем в гидротермальной системе Баранского. Микропримесями "заражен" гидротермально-метасоматический пирит, рассеянный по всему объему системы. Есть и характерные особенности в распределении отдельных элементов. Так, золото в качестве микропримеси в пирите обнаружено только на интервале 0-400 м от поверхности, As характерен для средних горизонтов (400-800 м), Pb образует устойчивые содержания по всему разрезу геологических блоков в зоне восходящего потока гидротерм и в нижней части блоков в области питания гидротермальной системы. Ртутью обогащен пирит в целом по всему разрезу гидротермальной системы, находящейся на этапе прогрессивного развития, с заметной тенденцией повышения содержаний к нижним горизонтам; фактически лишен Hg пирит глубоких разрезов остывающей гидротермальной системы. При этом во всех случаях основное обогащение пирита ртутью происходит в приповерхностных ар-гиллизитах зоны серно-кислотного выщелачивания. Эта тенденция (обогащение многими микропримесями пирита вмещающих пород современных гидротермальных систем от этапа прогрессивного развития к регрессивному этапу, т.е. с течением геологического времени) подтверждается микрозондовыми и спектральными анализами пирита низкотемпературной (температура растворов не превышает 110° С [3]) Паратунской гидротермальной системы. Кроме существенно более высоких содержаний здесь Au, As, Co, Hg и других элементов (в 5-10 раз выше, чем на Паужетке), необходимо отметить равномерное обогащение пирита микропримесями по всей глубине системы (распределение элементов изучено до глубины 1500 м) и ровное распределение микропримесей в пределах самих зерен. Пириты метасоматитов Паужетской гидротермальной системы и особенно системы Баранского обогащены микропримесями лишь в краевых частях зерен. Это подтверждает вывод об устойчивом постепенном (?) насыщении минералов-концентраторов (в частности, сульфидов) в недрах современной гидротермальной системы многими рудными и нерудными элементами.

Зоны восходящего и нисходящего потоков гидротерм в гидротермальной системе (горсты и опущенные блоки) различаются по составу микропримесей в пирите. Для первых характерны As, Ag, Mg, Si и Pb по всему разрезу; для вторых - Mn, Mo, Co, Ni, Zr и Pb в нижних горизонтах.

Таким образом, многие микропримеси в пирите и особенности их распределения служат индикаторами геологической и гидрогеологической структуры гидротермальной системы.

Основные характеристики распределений Au (среднее геометрическое содержание C_{cp} и стандартный множитель γ) в гидротермально-метасоматических образованиях

Тип новообразований	Гидротермальная система					
	Баранского			Паужетская		
	n	C_{cp} , мг/т	γ	n	C_{cp} , мг/т	γ
Пропилиты Кварц-адуляровые метасоматиты	21 11	1,58 4,73	3,01 2,63	8 176	7,33 21,04	1,75 1,78
Каолинит-монтмориллонитовые глины	47	2,51	5,66	106	10,66	1,49
Гейзериты и кремневые гели Сульфиды		3,15	1,93		90,74	4,28
Почвы термальных полей		7,53	2,33		7,30 22,29	3,76 2,92

Примечание. n - Число измерений; данные получены атомно-абсорбционным методом в Институте геохимии СО РАН, аналитики О.И. Бессарабова и С.Е. Чернигова.

Резко пониженным содержанием микропримесей в пирите выделяются мощные зоны кипения гидротерм. Пирит этих зон отличается и морфометрическими параметрами: преобладанием крупных размеров зерен (до 1,6 мм) и кубического габитуса, частым чередованием агрегатных, кристаллических и смешанных форм выделения, отсутствием побежалости на поверхности зерен. Вероятно, отмеченные особенности поведения микропримесей в пирите и изменения морфометрических показателей пирита объясняются особым термодинамическим режимом в зонах кипения растворов (резкими и, по-видимому, неоднократными колебаниями давления [6], большими перепадами температур минералообразования - от 300 до 170° С и ниже), высокой открытой пористостью (кавернозностью) пород, обуславливающей активное выщелачивание и механическое вымывание компонентов. Границы зоны кипения гидротерм выделяются, наоборот, повышенными значениями содержания микрокомпонентов в пирите, нижняя граница - высокими значениями Hg. Это обстоятельство подтверждает выдвинутую ранее концепцию формирования геохимических барьеров на границах пародоминирующих систем [5, 6] и может служить поисковым критерием древних гидротермальных рудных тел.

Судя по общему характеру распределения микропримесей ("зараженности" пирита многими элементами во всем объеме гидротермальной системы, повышению содержания Hg, Pb и других элементов в пирите к нижним горизонтам системы), источником некоторых рудных и нерудных компонентов в современной высокотемпературной гидротермальной системе может быть предполагаемый на глубинах > 2,0 км периферический магматический очаг [7, 18] или расположенное в области очага и, по-видимому, производное от него крупное остывающее субинтрузивное тело диоритового состава, кровля которого вскрыта бурением на интервале 900-1200 м от поверхности и изучена петрографическими, минералого-геохимическими, структурными и геофизическими методами [18-23]. Это не противоречит полученным ранее данным о привносе в высокотемпературную гидротермальную систему глубинным флюидом многих элементов (Fe, Mn, Mg, Ti, Cr, Al, Si, K, Na, Ca и др.) в составе рудных и силикатных магнитных шариков [19, 22].

Следует отметить общую тенденцию повышения концентраций элементов-примесей в пирите и в различных породах и новообразованиях от "горячей" гидротермальной системы к остывающей (поведение ртути вблизи поверхности аналогично, в недрах систем — обратно). В этом отношении показательно распределение содержания золота в гидротермальных образованиях (табл. 3) при средних значениях содержания Au в неизменных кайнозойских андезитобазальтах Курило-Камчатской

провинции 1,73 мг/т [2] - 1,02...2,10 мг/т [1]. В вулканитах дацит-риолитового ряда содержание Au обычно меньше 1 мг/т [13]. По-видимому, на ранних этапах формирования гидротермальных систем происходит постепенное накопление в огромной массе метасоматитов Au, Ag, As, Pb, Cu, Fe, Mg, Mn, K и других элементов, на поздних этапах - локализация этих элементов на геохимических барьерах (в рудных телах); могут образовываться эпитермальные золото-полиметаллические месторождения.

Авторы признательны С.В. Кореновой за помощь в отборе монофракций пирита, Н.И. Чебровой, Т.М. Философовой, С.В. Москалевой за большой объем выполненных аналитических исследований и всем специалистам, принявшим участие в обсуждении основных положений статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 93-05-8240 и 97-05-65006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдурахманов А.И., Федорченко В.И.* Закономерности распределения некоторых редких (Sc, Zr, V) и рудных (Cu, Au) элементов в четвертичных лавах Курильских островов // Вулканология и сейсмология. 1984. №4. С. 55-66.
2. *Аношин Г.Н.* Золото в магматических горных породах. Новосибирск: Наука, 1977. 207 с.
3. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки / Под ред. Сугрובה В.М. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1976. 284 с.
4. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / Под ред. Масуренкова Ю.П. М.: Наука, 1980. 172 с.
5. *Жатнуев Н.С.* Геохимический барьер на границе жидкость - пар в термоградиентной системе // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. № 4. С. 960-964.
6. *Жатнуев Н.С., Рычагов С.Н., Миронов А.Г. и др.* Пародоминирующая система и геохимический барьер жидкость - пар Верхнего термального поля Паужетского месторождения // Вулканология и сейсмология. 1991. № 1. С. 62-78.
7. *Злобин Т.К.* Строение литосферы в районе о. Итуруп по сейсмическим данным // Тихоокеанская геология. 1989. № 3. С. 33-41.
8. *Знаменский В.С.* Гидротермально измененные породы Мутновского (Камчатка) и Кипящего (о. Итуруп) геотермальных месторождений // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 5. С. 110-123.
9. *Знаменский В.С., Никитина И.Б.* Гидротермы центральной части острова Итуруп (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 44-65.
10. *Зотов А.В., Лапутина И.П., Чичагова А.В.* Мышьяковистый пирит из термальных источников о. Кунашир (Курильские острова) // Геология рудных месторождений. 1972. Т. 14. № 1. С. 125-131.
11. *Карпов Г.А.* Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковое оруденение. М.: Наука, 1988. 183 с.
12. *Карпов Г.А., Киреев Ф.А., Ероцев-Шак В.А.* Самородное железо в гидротермальной системе Камчатки // Докл. АН СССР. 1984. Т. 274. № 6. С. 1440-1443.
13. *Королева Г.П., Ломоносов И.С., Стефанов Ю.М.* Золото и другие рудные элементы в гидротермальной системе // Структура гидротермальной системы // Под ред. Белоусова В.И., Ломоносова И.С. М.: Наука, 1993. С. 253-280.
14. *Мархинин Е.К., Стратула Д.С.* Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
15. *Набоко С.И.* Металлоносность современных гидротерм в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1980. 198 с.
16. Паужетские горячие воды на Камчатке / Под ред. Пийпа Б.И. М.: Наука, 1965. 208 с.
17. *Пчелкин В.И.* К методике поисков термальных вод в районах современного вулканизма (на примере центральной части о. Итуруп) // Всесоюз. совещ. по подземным водам Востока СССР: Тез. докл. Иркутск: Ю.-Сахалинск, 1988. С. 57-58.

18. Рычагов С.Н. Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: модель геологической структуры // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 59-74.
19. Рычагов С.И. Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры и флюидного режима высокотемпературных гидротермальных систем островных дуг // Закономерности эволюции земной коры. Тез. докл. Т. 2. СПб., 1996. С. 151.
20. Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Гончаренко О.П. и др. Температурная и минералогическая характеристика геотермального месторождения Океанское (о-в Итуруп) // Геология рудных месторождений. 1993. Т. 35. № 5. С. 405-418.
21. Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Гончаренко О.П. и др. Температурный режим вторичного минералообразования и структура температурного поля в недрах гидротермальной системы вулкана Баранского (о-в Итуруп) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 96-112.
22. Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Сандимирова Е.И. Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры и флюидного режима современной гидротермальной системы Баранского (о. Итуруп) // Докл. АН. 1997. Т. 356. № 5. С. 677-681.
23. Рычагов С.Н., Степанов И.И. Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: особенности поведения ртути в недрах // Вулканология и сейсмология. 1994. №2. С. 41-52.
24. Современное вулканогенно-гидротермальное минералорудообразование / Под ред. Карпова Г.А. Материалы первой сессии Камчатского отделения ВМО. Ч. II. Владивосток: ДВО РАН, 1992. 108 с.
25. Структура гидротермальной системы / Под ред. Белоусова В.И., Ломоносова Н.С. М.: Наука, 1993. 298 с.
26. Трухин Ю.П., Степанов И.И., Шувалов Р.А. Ртуть в гидротермальном процессе. М.: Наука, 1986. 199 с.
27. Чернова А.Е., Озерова Н.А., Голованова Т.И. и др. Новые данные о ртутьсодержащих пиритах Двухъярточных источников (Камчатка) // Современное вулканогенно-гидротермальное минералорудообразование: Материалы первой сессии Камчатского отделения ВМО. Ч. II. Владивосток: ДВО АН СССР, 1992. С. 3-13.

Институт вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
10.10.1995