



УДК 551.23: 550.42

О. Ф. Карданова, Е. В. Карташёва

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

## Железистые осадки Кихпиньчского долгоживущего вулканического центра (КДВЦ)

Условия, при которых образуются железистые осадки в районе КДВЦ, очень разнообразны. Разброс значений pH, при которых осаждаются эти осадки, значителен (от 2,67 до 9,25), так же, как и температур (от <16 до 97–98° С). Железистые осадки представлены следующими минеральными классами: *сульфиды* (пирит, мельниковит, марказит, пирротин, макинавит, канзит); *окислы и гидроокислы* (сидерогель, гётит, гидрогётит, гематит, маггемит); *сульфаты* (К-Na, NH<sub>4</sub>- и H<sub>3</sub>O-ярозиты), *фосфаты* (вивианит, дельвоксит, фронделит, дестинезит и др.); *карбонаты* (сидерит).

### Введение

Впервые Кихпиньчский долгоживущий вулканический центр (КДВЦ) выделил В. И. Белоусов [1]. Массив Кихпиньч включает несколько разнородных разновозрастных сооружений. Вулкан Старый Кихпиньч датируется средним – верхним плейстоценом [2]. Этот вулкан образовался до этапа мощных игнимбритообразующих извержений и кальдерообразования в Восточной вулканической зоне (в интервале 23–40 тыс. лет [3]) и практически вся постройка вулкана сильно гидротермально изменена. Вулкан Старый Кихпиньч (СК) является основанием, как для двух голоценовых базальтовых конусов Молодого Кихпиньча, сформировавшихся после длительного (десятки тысяч лет) перерыва в вулканической деятельности, так и для расположенного несколько южнее дацитового вулкана Сопка Жёлтая, образовавшегося в конце позднего плейстоцена. Вулкан Молодой Кихпиньч состоит из конусов Западный и Савича, образовавшихся соответственно 4,8 и 1,4 тыс. л. н. Последнее извержение конуса Савича было 400–540 л. н. [2, 3].

В данном сообщении показано распространение железистых осадков в районе КДВЦ (рис. 1, 2), приведены их химический (табл. 1) и минеральный состав (табл. 2), условия образования осадков (состав воды, T° С и др.) показаны в табл. 3. Эти осадки были встречены на большинстве термальных полей (ТП) КДВЦ. Для исследования осадков использовались следующие методы: химический, минераграфический, ИКС, спектральный, рентгенографический, оптический, термический (рис. 3), микронзондовый, некоторые образцы изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа.

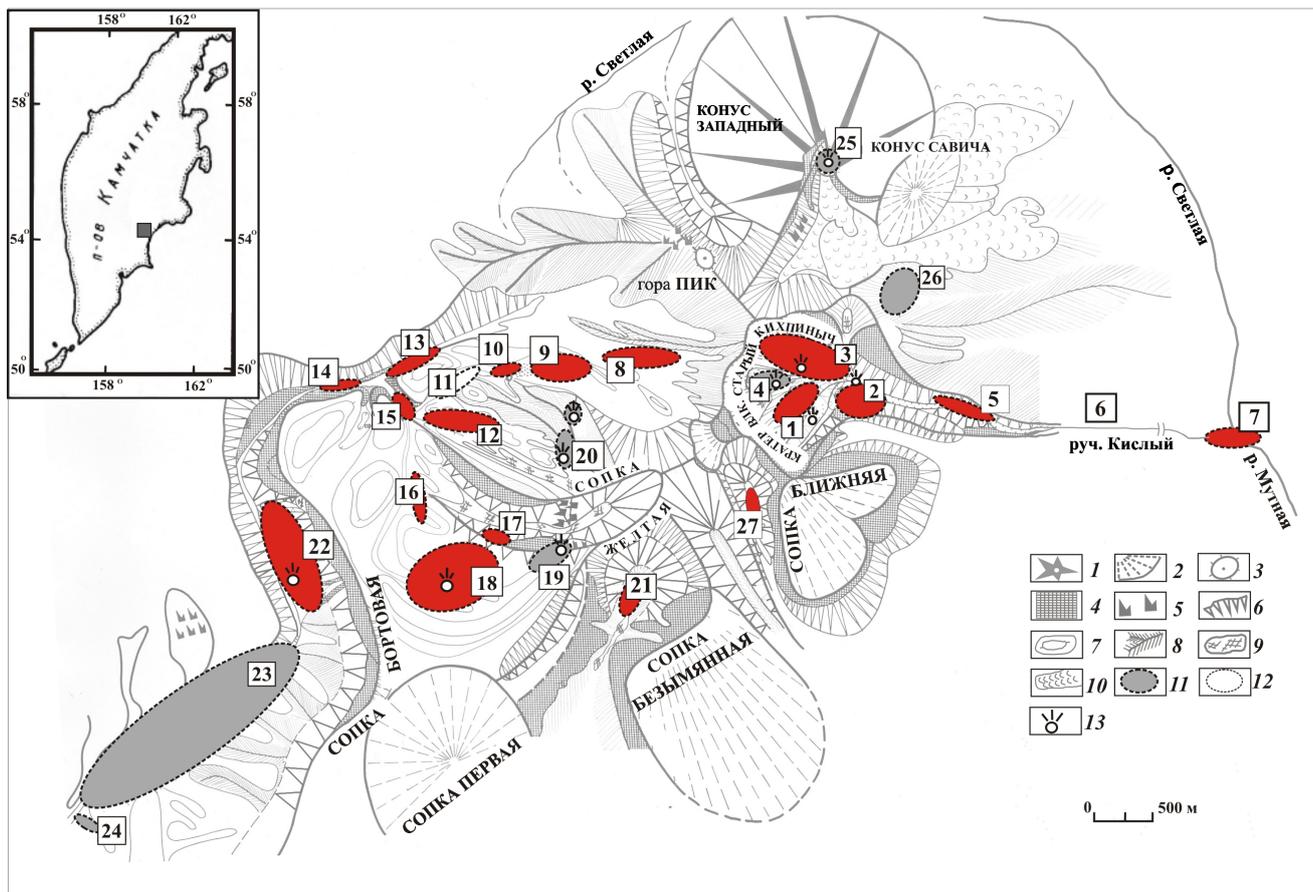
Различия в составе растворов, минерализации, металлоносности, T° С, ox-red определяются глубиной, на которой летучие компоненты выделяются из мантии. С. И. Набоко [13] выделяет два генети-

ческих типа гидротерм: первичные (магматические и магматогенные) и вторичные. Отдельные минеральные классы железистых осадков осаждаются из аммонийных близнейтральных (ТП 21) и кислых (ТП 1, ТП 2, ТП 3, ТП 15, ТП 18, ТП 22) магматогенных дифференциатов первичных гидротерм с H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub>. Из теплых вод сложного состава, низкой минерализации, которые являются подземными водами с малой долей эндогенного флюида, железистые осадки образуются на ТП 1, ТП 2, ТП 5, ТП 10, ТП 12, ТП 17, ТП 22, ТП 27. Это тёплые Cl-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> Ca-Na или Na-Ca воды. Из SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Ca тёплых вод (ТП 8, ТП 9, ТП 12, ТП 14, ТП 22), осаждаются железистые осадки, представленные обычно сидерогелем.

Железо в водах источников КДВЦ встречается в виде Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> (см. табл. 3). Максимальное содержание Fe<sup>3+</sup> (966 мг/л) было отмечено в одном из источников на ТП 3. На этом поле до обрушения Fe<sup>3+</sup> в источниках было больше (849–966 мг/л), чем после (<300 мг/л), содержание Fe<sup>2+</sup> – <0,3 мг/л. Высокое содержание Fe<sup>3+</sup> также на ТП 18 (до 260 мг/л) и ТП 22 (до 281 мг/л), при этом на ТП 18 содержание Fe<sup>2+</sup> – 18 мг/л, на ТП 22 до 62,8 мг/л, низкое содержание Fe<sup>3+</sup> на ТП 11 (до 25 мг/л) и ТП 15 (до 6,1 мг/л), Fe<sup>2+</sup> – < 0,3 мг/л. Но на ТП 6 в воде Fe<sup>2+</sup> – 60–75 мг/л, а Fe<sup>3+</sup> – < 0,3. На ТП 1 полевые замеры на устье субщелочных источников показывают содержание Fe<sup>2+</sup> до 100 мг/л, на ТП 7 (в зоне контакта водотоков р. Светлой и ручья Кислого) – до 120 мг/л Fe<sup>3+</sup> (см. табл. 3).

Железистые осадки КДВЦ образуются на следующих геохимических барьерах [6]: а) кислородном; б) сульфидном; в) щелочном; г) испарительном; д) сорбционном и е) термодинамическом (табл. 4).

Хемогенные осадки в источниках по условиям осаждения подразделяются на три группы. *Первая* – когда это единственный тип осадка в источни-



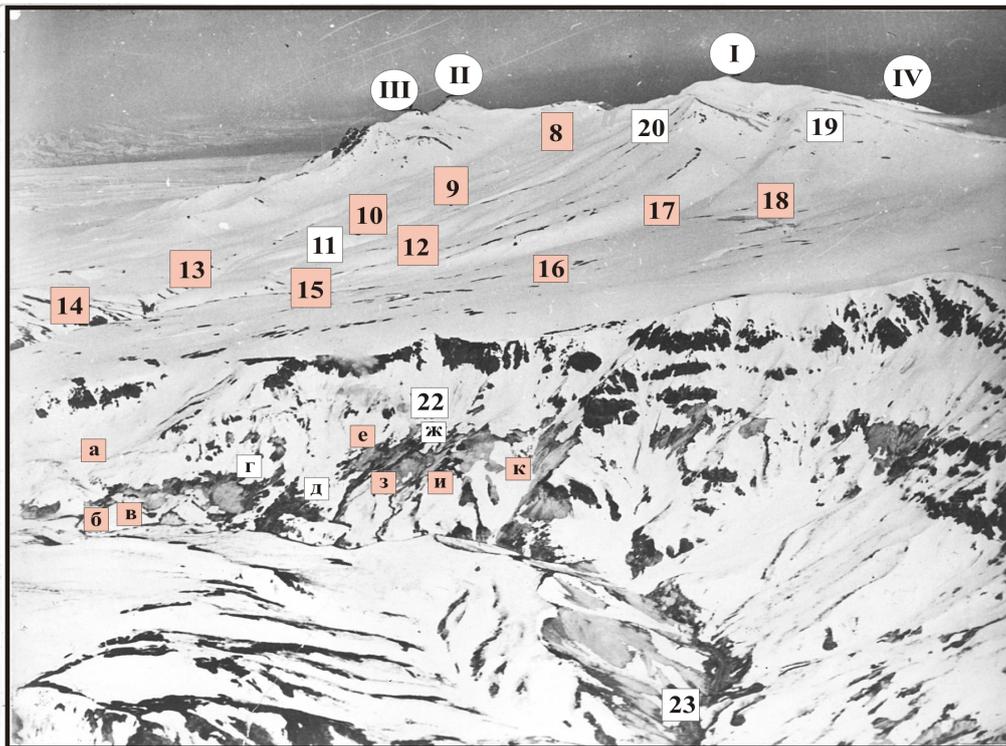
**Рис. 1.** Схематическая карта расположения термальных полей КДВЦ. Условные обозначения: 1 — лавовые конусы; 2 — лаво-пирокластические конусы; 3 — вершины; 4 — отвесные склоны; 5 — отдельные скалы; 6 — крутые склоны; 7 — горизонталы; 8 — водоразделы; 9 — снежники; 10 — лавовые потоки; 11 — термальные поля (цифра — номер поля); 12 — границы полей с холодными источниками; 13 — фумаролы. Термальные поля: 1–5 — вулкан Старый Кихпиньч (1 — Южное, 2 — Восточное, 3 — Северное, 4 — Западное, 5 — «Щёки»); 6 — русло ручья Кислого между полей «Щёки» и истоком реки Мутная; 7 — исток реки Мутная; 8 — Перевальное; 9 — Травентиновое; 10 — Тёплое; 11 — Серное (холодное); 12 — Каменный Карман; 13 — ручей Прозрачный; 14 — «Колорадо»; 15 — Долина Смерти; 16 — холодные источники Новые; 17 — горячий источник Новый; 18 — Южно-Кихпиньчское; 19 — Вершинное; 20 — Северо-Кихпиньчское; 21 — исток ручья Короткий Ключ; 22 — Верхне-Гейзерное; 23 — Долина Гейзеров; 24 — ручей Второй (в ~0,5 км от гейзера Перенец вниз по р. Шумная); 25 — Конус Савича; 26 — Склоновое; 27 — источник в верховье ручья Извилистый. На врезке показано расположение района исследований. Цветом выделены ТП, на которых встречаются железистые осадки.

ке, как на устье, так и по ходу водотока (сидерогель, гётит и гидрогётит) — встречается на ТП 1, ТП 8, ТП 10, ТП 12 (см. рис. 1). Вторая — когда на некотором удалении от устья источников на смену одним осадкам приходят другие. Это происходит на различных геохимических барьерах в связи с изменением параметров системы (снижение температуры, удаление  $\text{CO}_2$  из системы, изменение pH и др.), и тогда вместо образующегося на устье источника сидерогеля, на некотором расстоянии появляются карбонаты (арагонит — ТП 2, кальцит — ТП 9, ТП 14), или вместо серы осаждаются гидроксиды железа (ТП 3, ТП 15). Третья группа — осадки, образующиеся при смешении водотоков резко различного состава (сульфиды, оксиды и гидроксиды, сульфаты). Она была встречена на ТП 1, ТП 2 и ТП 7.

### Железистые осадки

Железистые осадки представлены следующими минеральными классами: *сульфиды* (пирит, марказит, мельниковит, пирротин, канзит, макинавит), *оксиды и гидроксиды* (сидерогель, гидрогётит, гётит, гематит, маггемит), *сульфаты* (К-Na-,  $\text{NH}_4$ -,  $\text{H}_3\text{O}$ -ярозиты), *фосфаты* (вивианит, дестинезит, дельвоксит, фронтелит, и др.), *карбонаты* (сидерит).

Сульфиды Fe образуются при  $T = 80\text{--}98^\circ\text{C}$  в котлах, на устьях грифонов в источниках и на дне «сковородок» из сульфатной воды со сложной анионной частью  $\text{NH}_4 \gg \text{Fe} \sim \text{H} > \text{Al} \sim \text{Ca} \gg \text{Na} \sim \text{Mg} > \text{Mn}, \text{K}$ . Образование гидроксидов железа, марказита, пирита или сульфурита на устьях источников и гидроксидов по их руслу объясняется различной концентрацией  $\text{H}_2\text{S}$ , различными соотношениями



**Рис. 2.** КДВЦ со стороны р. Гейзерной (фото В. И. Белоусова, июнь 1967 г.). I — сопка Жёлтая, II — конус Савича, III — гора Пик, IV — сопка Безымянная. Названия термальных полей см. на рис. 1. Участки Верхне-Гейзерного термального поля: а — ручей Кровавый, б — Малышка, в — Большая фумарола, г — Лагерный, д-е — Термальное болото (д — нижняя площадка, е — верхняя), ж — исток ручья Горячего (виден столб пара), з-и — ручей Тёплый (з — северная площадка, и — южная), к — ручей Подъёмный. Цветом выделены поля и участки ТП 22, где встречаются железистые осадки.

концентраций  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ , а также различными значениями pH. Известно, что марказит осаждается в кислой среде, а пирит — в слабокислой или нейтральной. В источниках *группы А* высокое содержание  $\text{H}_2\text{S}$  вместе с низкими значениями pH растворов (pH = 1,9–2,5) препятствует отложению гидроксидов железа. В этой группе горячих источников лежащие на дне обломки породы покрыты пленкой марказита, т. к. за счёт поступления  $\text{H}_2\text{S}$  среда восстановительная. Выше, до границы «вода — воздух», происходит окисление  $\text{H}_2\text{S}$  кислородом воздуха и выпадает самородная сера. Далее, на границе «вода — воздух», за счёт падения температуры и испарения минерализованных вод образуется гипс, когда соотношения компонентов в воде такие:  $\text{Fe} \gg \text{Al} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{H} > \text{Na}, \text{NH}_4, \text{Mn}, \text{K}$  или кремнезём, если  $\text{Ca} \sim \text{Al} \sim \text{H} > \text{Na} \sim \text{Mg} > \text{Fe}, \text{K}, \text{NH}_4, \text{Mn}$ . На устьях источников *группы Б* происходит осаждение марказита или пирита. Пирит часто имеет кубический габитус и штриховку на гранях. Кубический габитус кристаллов пирита типичен для слабых пересыщений [10]. Пиритный осадок на устье сменяется на некотором удалении плащом гидроксидов Fe при таких соотношениях компонентов в воде:  $\text{NH}_4 \gg \text{Na} \sim \text{Ca} \sim \text{Mg} > \text{K} > \text{Fe}$ . Часто на устьях небольших выбрызгивающих источников осаждается мельниквит, сменяющийся в местах попадания

брызг гидроксидов железа. В *группу В* объединяются источники, на устьях которых осаждаются гидроксиды железа (гётит и гидрогётит) с небольшой примесью марказита и ярозита. В воде, из которой осаждаются эти осадки, соотношения компонентов таковы:  $\text{Fe} \gg \text{Al} \sim \text{Ca} > \text{Mg} \sim \text{H} > \text{Na}, \text{NH}_4, \text{K}, \text{Mn}$ . Источники, на устьях которых отлагается сульфурит, сменяющийся вниз по течению водотока гётитом и гидрогётитом, объединены в *группу Г*. Известно, что когда содержание  $\text{H}_2\text{S}$  невелико и не может предотвратить выпадение гидроксидов железа, непосредственно на устье образуется сульфурит, а ниже — в местах растёка термальной воды — гидроксиды железа. Без участия  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$  в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала могут формироваться либо гидроксиды железа, либо магнетит [15]. Влияние  $\text{H}_2\text{S}$  сказывается на появлении сульфидов железа.

**Сульфиды железа** (пирит, марказит, мельниквит) образуются в источниках и на дне «сковородок» на устьях грифонов с  $T = 80\text{--}98^\circ\text{C}$  на ТП 3 в кратере СК, в источниках и котлах ТП 18, на ТП 22 сульфиды железа встречаются почти на всех участках (см. рис. 2). На последнем поле довольно часто пирит и марказит цементируют гальку и мелкие обломки породы, изредка встречаются канзит, макинавит и пирротин ( $\text{Fe}_8\text{S}_9$ ).

Таблица 1. Химический состав железистых осадков, вес. %

Компоненты	ТП 1а		ТП 1б		ТП 2	ТП 3			ТП 6	ТП 7					
	727	800б	803а	1023г		1063б	1029в	1029 г.			755	896б	896в	898б	760а
SiO <sub>2</sub>	8,20	12,48	17,48	13,32	6,28	8,62	4,54	14,92	2,34	8,42	3,84	1,44	5,07	13,94	9,64
TiO <sub>2</sub>	0,25	0,04	0,80	<	<	0,18	0,12	0,20	0,32	0,16	0,25	0,13	0,06	0,01	0,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<	3,03	8,04	4,53	1,67	4,23	2,25	1,37	1,95	4,70	5,59	2,66	2,54	4,10	3,96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,28	56,68	45,00	40,80	60,66	51,71	56,56	51,11	54,00	44,00	58,80	68,85	55,78	49,00	50,67
FeO	<	0,14	<	<	0,56	<	<	0,10	<	<	<	0,26	0,34	<	1,14
MnO	0,09	0,16	0,06	0,25	0,13	0,02	0,02	0,13	<	<	<	0,04	0,03	0,23	0,03
MgO	0,43	0,20	2,32	1,61	0,55	0,55	0,15	0,52	1,37	0,76	1,11	0,68	0,27	<	1,16
CaO	3,82	1,91	2,84	6,58	3,22	0,98	1,26	3,07	1,62	0,92	0,92	0,20	<	2,45	0,63
Na <sub>2</sub> O	0,13	0,16	0,05	0,32	0,10	0,19	0,19	0,18	0,05	0,20	0,16	0,13	0,20	0,38	0,27
K <sub>2</sub> O	0,24	0,12	1,02	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,84	0,24	0,48	0,24	0,12	0,24	0,24
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	18,90	15,00	22,00	28,00	26,47	24,03	25,03	15,58	11,68	10,60	9,72	4,92	9,80	17,00	9,01
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	8,99	8,22	<	<	<	<	<	10,44	14,50	15,40	13,10	14,56	13,13	<	11,73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,21	0,19	<	<	<	<	<	1,15	0,12	ст.	0,11	0,75	0,17	<	<
SO <sub>3</sub> (общ.)						8,37	10,00	0,37	11,68	14,15	6,00		12,74		
CO <sub>2</sub>	0,63	1,79		4,05		0,40									
П.П.П.												5,42			
Сумма	100,17	100,12	99,61	99,70	99,88	100,32	100,34	99,38	100,47	99,55	100,08	100,28	100,25	100,12	100,34

Продолжение таблицы 1.

Компоненты	ТП 8		ТП 9		ТП 10		ТП 12		ТП 14		ТП 22				
	542	543	573	573a	633/2	634/5	642	1053	1054	363	363a	9 Б	595	393	30
SiO <sub>2</sub>	12,28	15,86	17,58	22,32	16,44	14,22	12,86	14,34	12,04	9,90	11,82	2,44	12,79	14,48	12,70
TiO <sub>2</sub>	0,23	0,27	<	<	0,22	0,22	0,14	0,15	0,06	0,25	0,02	0,14	0,22	0,40	сл.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,70	1,85	0,20	1,13	0,97	0,30	0,74	1,01	<0,02	2,11	1,37	2,83	0,38	4,06	15,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	62,87	54,80	52,34	43,52	58,00	61,96	60,94	57,91	60,00	64,16	63,47	74,00	57,91	58,90	48,00
FeO	0,57	0,43	0,40	0,49	0,22	0,28	0,40	0,32	0,46	1,00	0,72	0,95	0,43	0,28	1,09
MnO	0,08	1,04	0,16	0,75	<	0,02	0,04	0,10	0,15	0,05	0,05	0,03	0,02	сл.	сл.
MgO	0,42	0,68	<	0,45	0,36	0,40	<	<	<	0,21	0,40	0,16	0,36	0,22	0,33
CaO	0,86	1,40	1,31	2,57	0,67	0,67	0,79	2,38	1,12	1,11	0,10	0,18	0,54	0,33	0,94
Na <sub>2</sub> O	0,12	0,24	0,16	0,20	0,12	0,08	0,12	0,16	0,18	0,54	0,31	0,18	0,08	0,06	0,27
K <sub>2</sub> O	0,12	0,12	0,12	<	0,12	0,12	0,12	0,12	0,24	0,24	0,12	0,10	0,12	0,12	0,32
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	14,52	12,52	13,72	13,75	12,82	14,24	13,58	13,88	16,37	9,86	13,00	4,64	10,20	18,41	3,66
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	6,71	9,86	9,71	12,66	8,67	7,56	8,22	6,93	7,51	8,13	7,65	11,98	11,58	<	13,41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,62	2,03	0,82	0,22	0,06	0,03	0,04	<	0,04	0,74	0,44	0,04	<	сл.
SO <sub>3</sub> (общ.)	<	<	<	<	1,78	<	0,66	0,82	<	1,65	<	1,36	4,78	2,46	3,78
CO <sub>2</sub>	<	<	2,20	<	<	1,08	1,08	1,90	2,33	0,32	<	<	<	<	<
П.П.П.															
Сумма	99,55	99,69	99,93	99,66	100,61	100,13	99,72	100,26	100,46	99,57	99,77	99,43	99,45	99,69	99,61

Таблица 2. Минеральный состав железистых осадков.

	ТП 1 а						ТП 1 б				ТП 2	ТП 9	
	727	730б	803а	827	1023 г.	1063б	1029в	1029г	1031	819	755	573а	579
Сидерогель	86	81	66	74	68	87	65	66	71	85	73	64	45
Гётит + гидрогётит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Марказит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ярозит	—	—	—	—	—	—	11	21	—	—	—	—	—
Алунит	—	—	—	—	—	—	11	5	—	4	—	—	—
Опал	—	—	—	—	—	—	—	—	11	—	—	—	—
SiO <sub>2</sub> аморф.	—	—	2	—	5	—	10	4	—	—	6	15	24
Алюмогель	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Аллофан	—	—	—	14	—	—	—	—	3	—	—	—	—
Каолинит	—	—	5	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—
Дельвоксит	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	4	3	9
Вады	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	1	2
Гипс	1	1	—	—	—	—	—	2	8	—	1	—	1
Кальцит	—	—	—	—	9	—	1	—	—	—	—	—	—
Сидерит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Мех. примесь	12	17	27	12	15	13	2	2	5	11	16	17	19

Таблица 2. Продолжение.

	ТП 3					ТП 7			ТП 14	ТП 22			
	896б	896в	898б	759	760	1047б	1047в <sub>2</sub>	1047в <sub>3</sub>	1054	9Б	30	41	393
Сидерогель	—	—	—	—	—	—	30	53	75	—	—	—	—
Гётит + гидрогётит	64	49	79	85	80	50	—	—	—	85	76	55	74
Марказит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
Ярозит	21	27	14	2	8	15	—	19	—	4	3	—	—
Алунит	5	12	—	7	7	10	—	10	—	—	—	6	—
Опал	—	—	1,5	1	—	18	—	—	—	—	8	—	10
SiO <sub>2</sub> аморф.	0,5	8	—	—	—	—	—	11	19	—	—	—	—
Алюмогель	—	—	—	—	—	—	35	—	—	—	—	—	—
Аллофан	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	—	32	—
Каолинит	—	—	—	—	—	—	24	—	—	—	—	—	9
Дельвоксит	0,5	—	0,5	1	3	—	2	—	—	—	—	—	—
Вады	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Гипс	—	—	—	3	—	7	—	1,5	—	2	—	3	2
Кальцит	—	—	—	—	—	—	—	0,5	3	—	—	—	—
Сидерит	—	—	—	—	—	—	4	—	3	—	—	—	—
Мех. примесь	4	4	5	1	2	—	5	5	—	2	13	4	3

Таблица 3. Химический состав воды некоторых источников КДВЦ, из которой осаждаются железистые осадки (мг/л).

№ обр.	ТШ 1										ТШ 2					
	726	727	728	8005	8005*	1023г.	10635	10635*	819	1029в	755	756	823	1050а	1050б	1050в
H <sup>+</sup>			1,32							0,90						
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	6,00	4,50	0,10	7,50	2,00	12,80	5,30	13,00	11,30	6,20	3,00	3,80	18,00	10,00	3,00	11,20
Na <sup>+</sup>	27,00	27,00	6,00	35,90		27,60	39,80		53,90	55,00	41,00	41,00	46,00	41,40	41,40	42,90
K <sup>+</sup>	2,90	2,90	0,40	2,10		1,60	2,50		3,10	3,00	4,20	4,40	4,50	2,60	2,70	3,20
Ca <sup>2+</sup>	473,00	503,00	142,00	525,00		381,00	533,00		579,10	489,00	281,00	327,00	417,00	446,20	441,30	392,80
Mg <sup>2+</sup>	112,00	69,00	23,00	90,00		60,00	85,20		94,80	99,70	103,00	105,00	100,00	89,20	81,90	94,00
Mn <sup>2+</sup>	0,30		3,00	1,20		2,00	0,90		2,30	2,10			0,27			
Fe <sup>2+</sup>			<		60,00			98,25		<						
Fe <sup>3+</sup>			2,00		<			1,75		3,90						
Al <sup>3+</sup>	0,30		11,00							36,40						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	257,00	197,00		183,00	536,40	155,00	160,00		101,50		71,00	270,00	443,00	483,10	448,00	406,00
Cl <sup>-</sup>	0,70	0,70	<	2,80		2,10	1,40		<0,5	3,60	1,40	<0,5			<0,5	1,40
F <sup>-</sup>			0,40	0,50		0,30	0,40		2,30	2,00				0,50	0,08	0,09
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1364,00	1392,00	540,00	1498,00		1094,00	1513,00		1651,20	1956,00	1085,00	1066,00	1230,00	1094,40	1075,20	1036,80
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>			60,00							61,10						
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>																
H <sub>4</sub> SiO <sub>4р.</sub>	75,3	67,0	57,5	64,0		67,8	46,30		27,5	77,2	155,00	160,00	146,00	132,00	132,00	126,00
H <sub>4</sub> SiO <sub>4к.</sub>	<	17,3	48,5	12,0		8,2	<0,1		22,5	14,3	9,50	14,00	19,00	48,00	85,50	79,00
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	<	<	9,0	<		<	1,40		2,2	1,8	<0,6	0,60		5,60	4,50	4,30
M, г/л	2,32	2,28	0,90	2,42		1,81	2,39		2,55	2,80	1,75	3,33	2,42	2,35	2,32	2,22
pH п.				5,80			6,41		6,80				5,46	6,99	6,86	
pH л.	7,95	7,85	2,95	7,70		8,09	7,72		7,65	3,10	7,9	7,6	7,68	7,15	7,10	7,77
T° C	18	18	4	13			18		10	хол.	38	39	38	35	35	35
Еh, mv				-120						220			40			

Продолжение табл. 3.

№ обр.	ТП 6		ТП 7			ТП 12		ТП 9		ТП 10	ТП 27					
	912	913	10476	10476*	1516	1047в	1048	1057	634	642	573	573a	901	633	866	866a
H <sup>+</sup>	3,80	3,50	2,40		1,28			2,20	<0,1	0,10	0,40	<0,1	<0,5	<0,1	<0,5	<0,5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	8,50	6,20	12,80	7,50	1,70	8,80	8,80	1,40	6,60	4,60	25,60	6,50	30,70	23,50	6,90	6,90
Na <sup>+</sup>	42,90	42,90	27,80		30,60	1,20	12,40	0,60	25,30	1,96	4,80	1,10	5,00	4,90	0,40	0,90
K <sup>+</sup>	3,90	3,90	2,30		1,40	1,70	1,90	0,60	13,50	11,20	53,10	10,40	89,80	41,08	48,10	47,30
Ca <sup>2+</sup>	309,00	308,00	262,00		268,50	12,40	24,20	0,20	3,40	4,60	8,60	2,70	8,70	10,60	6,90	6,00
Mg <sup>2+</sup>	45,70	45,70	40,10		26,80	7,30	8,60									
Mn <sup>2+</sup>	0,60	0,50	0,70		2,70	<0,1	<0,1									
Fe <sup>2+</sup>	74,70	64,20	9,20		<											
Fe <sup>3+</sup>			30,20	120,00	61,40			0,08								
Al <sup>3+</sup>	52,00	66,70	41,00		38,30											
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>						58,60	26,80	7,30	69,30	61,00	256,30	42,70	655,10		41,50	32,30
Cl <sup>-</sup>	19,80	18,40	18,80	18,40	12,10	6,40	7,10	<0,5	1,41	1,40	1,41	1,40		2,12	<0,5	<0,5
F <sup>-</sup>	1,40	1,80	0,70		0,85	0,60	0,50	0,40							0,60	0,50
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1490,00	1416,00	1225,00		1191,10	48,00	101,00	5,30	9,30	3,50	24,60	8,60	76,80	221,90	134,00	124,80
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	163,00	141,00	101,00													
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>																3,60
H <sub>4</sub> SiO <sub>4р.</sub>	142,0	65,5	138,0		142,70	52,0	55,5	13,00	70,00	100,00	165,00	22,00	160,00	209,00	69,00	39,00
H <sub>4</sub> SiO <sub>4к.</sub>	4,5	48,1	<0,1		97,10	17,0	12,3	0,20	19,00	100,00	17,00	0,10	25,00	<4,00	27,00	30,50
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	6,4	9,2	4,3		2,50	4,3	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	2,20	<0,6	2,20	1,50
M, г/л	2,37	2,24	1,91		1,88	0,26	0,26	0,03	0,22	0,29	0,56	0,10	1,05	0,51	0,34	0,29
pH п.	2,84	2,84	2,83	2,83		7,28	7,48	5,90	6,26		6,67	8,04	6,16	5,28	7,40	7,40
pH л.	2,50	2,54	2,68		2,94	7,60	7,13	6,00	7,30	7,90	7,65	7,10	8,04	4,05	7,70	9,25
T, °C	15	16	13		11	13	13	16	26	хол.	21	21	27	8,5	6,6	6,6
Eh, mv	550	550	105		390				30		10	10	10	65	20	±0

Окончание табл. 3.

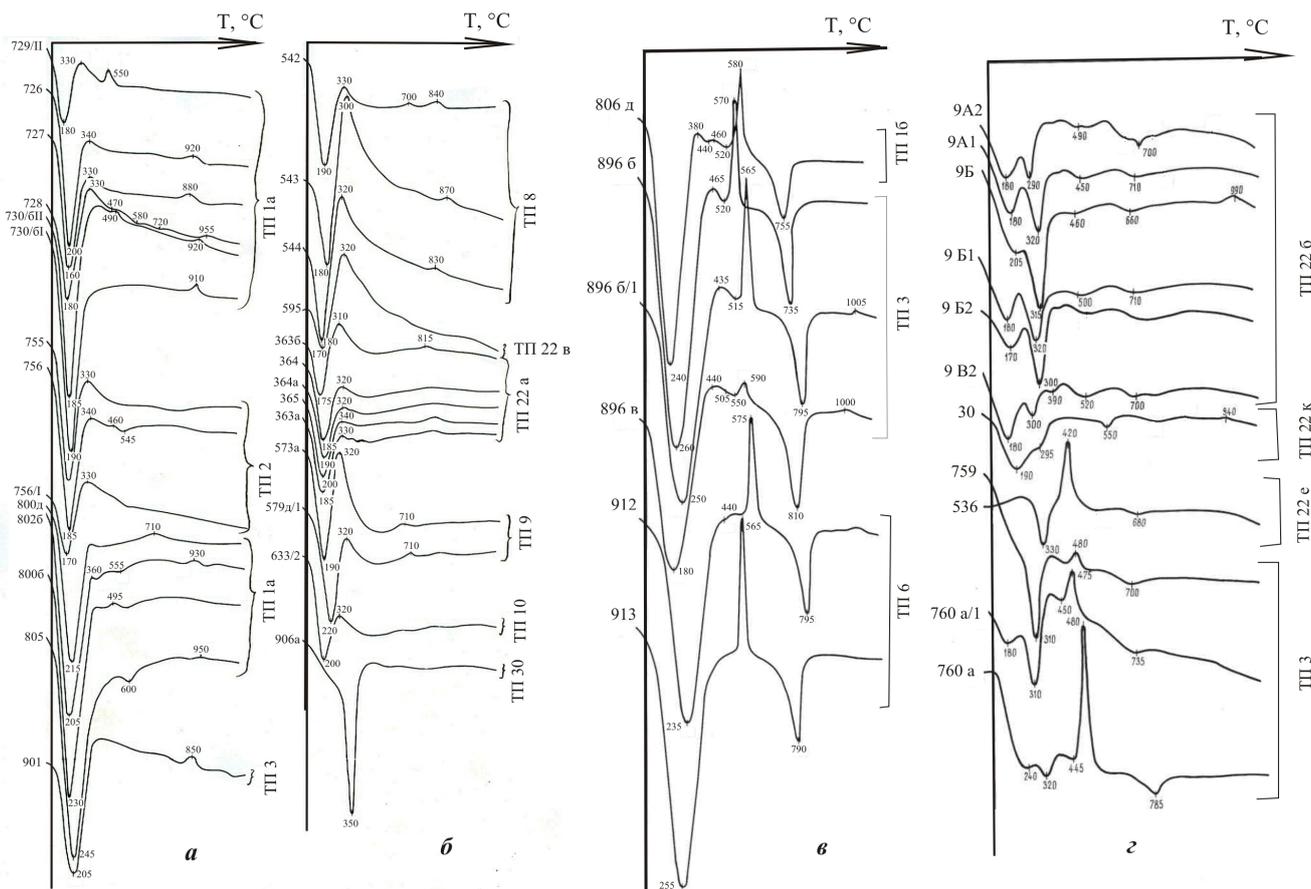
№ обр.	ТП 3			ТП 14		ТП 8		ТП 22							
	896б	896в	898б	759	762	1053	1054	542	363а	393	536	595	607	608	631
H <sup>+</sup>	2,80	4,30	2,80	5,00	6,90				5,40	2,50	6,80	4,00	6,80	0,60	3,80
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	3,00	9,00	30,00	18,70	3,00	3,00	3,00	0,10	150,00	35,30	1,80	4,00	1,80	150,00	3,80
Na <sup>+</sup>	46,90	47,90	38,30	45,40	35,30	24,60	39,20	10,00	4,10	13,30	9,20	42,00	9,20	8,50	6,90
K <sup>+</sup>	3,50	3,90	3,80	1,60	5,40	5,20	5,10	2,00	1,30	8,30	2,30	10,00	2,30	1,80	2,80
Ca <sup>2+</sup>	489,00	477,00	184,00	385,00	481,00	77,20	37,10	30,10	7,60	14,40	8,80	65,00	8,80	8,00	18,40
Mg <sup>2+</sup>	68,10	65,70	77,80	77,80	131,00	23,70	15,80	5,90	2,70	8,30	2,40	14,00	2,40	3,40	15,10
Mn <sup>2+</sup>	4,40	4,40	3,30	2,70	2,50	<0,2	<0,2		0,80		0,20	1,00	0,20	0,30	
Fe <sup>2+</sup>	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3			22,30					
Fe <sup>3+</sup>	34,60	165,00	112,00	653,00	966,00	<0,3	<0,3		41,00	29,40	15,60	2,20	15,60	2,20	46,90
Al <sup>3+</sup>	40,60	84,00	31,00	174,00	261,00	0,20	0,20		56,70	8,70	18,00	27,70	18,00	27,70	47,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>						283,00	271,00	62,20	48,20			88,00			
Cl <sup>-</sup>	6,40	15,60	7,80	32,60	39,70	1,10	<0,5	2,10	<0,5	1,40	3,60	2,00	3,60	4,30	4,20
F <sup>-</sup>	2,10	3,50	2,30	20,60	26,80	0,60	0,60		0,70		0,01				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1891,00	2246,00	1411,00	3598,00	4796,00	138,00	25,00	38,40	1,90	1021,00	995,00	276,00	504,00	595,00	696,00
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	146,00	269,00	112,00	458,00	518,00				211,00	25,00	131,00				97,00
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>							3,30								
H <sub>4</sub> SiO <sub>4р.</sub>	96,00	143,00	28,40	335,00	487,00	149,00	161,00	115,00	375,0	456,0	415,0	213,0	415,0	347,0	317,0
H <sub>4</sub> SiO <sub>4к.</sub>	47,00	11,00	25,00	104,00	249,00	<0,1	<0,1	<0,1	65,0	50,0	<0,1	287,0	<0,1	<0,1	37,0
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	<0,6	<0,6	<0,6	7,10	1,10	<0,6	<0,6	<0,6	9,3	<0,6	3,5	<0,6	3,5	1,5	<0,6
M, г/л	2,88	3,55	2,33	5,92	8,01	0,70	0,56	0,27	>0,07	1,29	1,67	1,00	1,12	1,15	1,30
pH п.	3	2,84	2,66			7,28	6,70		2,20	3,02	2,46	6,28	2,46	3,66	
pH л.	1,65	2,46	2,64	2,4	2,25	7,80	8,16	7,17	2,30	2,65	2,22	7,25	2,22	3,30	2,50
T, °C	хол.	18	97	97	32	29	26	29	<16	36	87	58	88	94	
Eh, mv	460	430	200							400	430	50	430	440	

Примечание. \* – полевые замеры компонентов. Пробы: 607/79 = ист. 9Б, 608/79 = ист. 9В, 631/79 = ист. 9А; ТП 1–ТП 27 – расположение термальных полей см. рис. 1.

Таблица 4. Типы барьеров, на которых в районе КДВЦ происходит образование железистых и некоторых других химических типов осадков.

Физико-химические условия	Состав вод, поступающих к геохимическому барьеру												
	Кислородные воды (O <sub>2</sub> )			Глеевые воды (CO <sub>2</sub> )			Сероводородные воды (H <sub>2</sub> S)						
Окислительно-восстановительные	Сильнокислые	Кислые и слабокислые	Нейтральные и слабощелочные (содовые)	Сильнокислые	Кислые и слабокислые	Нейтральные и слабощелочные (содовые)	Сильнокислые	Кислые и слабокислые	Нейтральные и слабощелочные	Сильнокислые	Кислые и слабокислые	Нейтральные и слабощелочные	Сильнокислые (содовые)
Щелочно-кислотные													
Границы pH в зоне гипергенеза	<3	3 – <6,5	6,5–8,5	>8,5	<3	3 – <6,5	6,5–8,5	>8,5	<3	3 – <6,5	6,5–8,5	>8,5	>8,5
Геохимический барьер	Кислородный	Fe	Fe, Mn	Mn	–	Fe	Fe, Mn	(Fe), Mn	S, (Fe)	S	S	S	S
	Сульфидный (сероводородный)	–	–	–	–	Fe	Fe	Mn, (Fe)	–	–	–	–	–
	Щелочной	Mn, Fe	–	–	–	Mn, Fe	Mn, Fe	Mn	Mn, Fe	–	–	–	–
	Испарительный	Mn, Fe, S	–	Ca, S	–	–	–	Ca, S	Ca, S	–	Ca, S	–	–
	Сорбционный	Si	Si, S	S	S	Si	Fe, Mn, Si	–	–	–	–	–	–
Термодинамический	–	–	–	–	–	Mn, Fe, Ca	Mn, Fe, Ca, Mn	–	–	Ca	Ca	–	

Примечание. Сокращенная таблица, показывающая барьеры, на которых осаждаются Fe осадки и осадки элементов, встречающихся в парагенетических ассоциациях с ними.



**Рис. 3.** Термограммы железистых осадков КДВЦ. Расположение термальных полей (см. рис. 1), участков ТП 22 (см. рис. 2). На рис. 3 а-б приведены кривые ДТА сидерогелей на некоторых полях. Кривые ДТА образцов, состоящих преимущественно из гётита, гидрогётита и  $\text{H}_3\text{O}$ -ярозита показаны на рис. 3 в. На рис. 3 г — кривые ДТА образцов, состоящих преимущественно из гётита и гидрогётита, с примесью ярозита (обр. 9А1, 9А2, 9Б1, 9Б2, 9В2), каолинита (9Б, 30); обр. 760 и 760а состоят из гётита и гидрогётита с примесью марказита (+)  $475\text{--}480^\circ\text{C}$  и ярозита — (–)  $400\text{--}480^\circ\text{C}$  и (–)  $720\text{--}800^\circ\text{C}$ ; обр. 536 и 759 состоят из гётита с примесью марказита.

На ТП 22 сульфиды нередко представлены корочками, центральная часть которых состоит из пирита, а ближе к краям — из пирита и мельниковита или из мельниковита, пирита и марказита. На дне некоторых ручьёв (ТП 15), около грифонов с  $T = 20\text{--}22^\circ\text{C}$  были чёрные участки размером  $(0,3\text{--}0,5) \times (1\text{--}1,5)$  м, представленные пиритом. В 1997 г. по ручью Кислому сошёл лахар, образовавший на последних километрах большое каолиновое поле. В зоне впадения ручья в р. Светлую (истоки р. Мутной, ТП 7), был каолиновый слой более 10 см мощностью, при высыхании которого образовывались скорлупы этого осадка, разделенные двумя слоями кубических кристаллов пирита мощностью до 5 мм. Самый верхний каолиновый слой имел мощность 1–2 см, следующий — 3–4 см, нижний слой, на момент обследования, был ещё влажный. Условия, при которых возможно образование этих осадков, в том числе пирита, показано в статье [8]. Рассмотрим подробнее отдельные минералы.

**Канзит** был обнаружен рентгеновским методом в сульфидной корочке на ТП 22, з (см. рис. 2) сов-

местно с пиритом и мельниковитом. В датированных отложениях Челекена Л. М. Лебедев [12] установил метастабильные сульфиды железа, которые существуют короткое время (несколько месяцев) и последовательно переходят один в другой в следующем порядке: аморфный моносульфид железа  $\rightarrow$  канзит  $\rightarrow$  макинавит  $\rightarrow$  мельниковит. Он показал, что мельниковит никогда не возникает путём реакции между железом и серой, а требует для своего возникновения предшествующего существования макинавита в системе. Им было отмечено, что на последовательность превращения в указанном выше ряду не оказывают влияния ни колебания температуры, ни какие-либо изменения рН или окислительно-восстановительного потенциала. Определяющий фактор — избыток серы в системе. Происходит увеличение сернистости соединений по схеме:  $\text{FeS} \rightarrow \text{Fe}_3\text{S}_4 \rightarrow \text{FeS}_2$ .

**Пирротин**  $\text{Fe}_8\text{S}_9$  был обнаружен микронзондовым анализом в сульфидной корочке, в которой определены также канзит и пирит. Эта корочка, цементирующая мелкие обломки породы, была отобрана

на устье одного из источников. Пирротин неустойчив и переходит в марказит, а затем в пирит [10].

**Пирит** образуется из слабокислых и щелочных вод и в районе КДВЦ очень часто встречается в виде куба (иногда до 1–3 мм), реже пентагон-додекаэдра и их комбинации. Часто на гранях куба наблюдается комбинационная штриховка. Подобная штриховка возникает в процессе роста кристаллов в изменившихся условиях, на месте куба постепенно формируются грани пентагон-додекаэдра. Кубический габитус типичен для слабых пересыщений, появление на гранях грубых и редких штрихов указывает на интенсивно минерализованные зоны [4, 10]. Кубические кристаллы пирита встречаются на ТП 7, ТП 18, ТП 22. На поверхности белых каолиновых котлов на ТП 18 часто наблюдается чёрная плёнка, состоящая из очень мелких кубических кристаллов пирита, что наглядно показал электронный сканирующий микроскоп. Наиболее разнообразные формы выделения пирита на ТП 22: это кубические кристаллы на устьях источников и небольших котлов, иногда пентагон-додекаэдрические кристаллы и комбинации этой формы с кубом; редко встречаются чёрные котлы, в которых осадки представлены взвесью очень мелких кубических кристаллов пирита. На этом поле галька изменённых пород часто цементируется сульфидами, состоящими из пирита или пирита и марказита. На отдельных участках ТП 22 в осадках встречается метаколлоидный пирит в виде характерных сферических агрегатов мелких глобулей. Пирит часто образуется на устьях горячих источников с  $T > 90^\circ\text{C}$ , но на ТП 7, в зоне смещения вод ручья Кислого и реки Светлой, образование минерала происходило в при  $T < 16^\circ\text{C}$ .

**Марказит** встречается в виде ромбо-дипирамидальных, реже радиально-лучистых агрегатов и нередко наблюдается в сростаниях с пиритом. Подобные сростания особенно хорошо видны в аншлифе. Марказит часто нарастает на кубические кристаллы пирита, образуя около него «рубашку», что указывает на смену условий образования. Марказит осаждается из кислых вод с  $\text{pH} = 1,9\text{--}3,25$ , часто покрывая тонким слоем гальку и мелкие обломки пород, находящиеся в воде.

Под названием *мельниковит* известны скрытокристаллические метаколлоидные образования чёрного или серо-чёрного цвета и плотного или рыхлого сложения. Этот минерал встречается на устьях горячих источников, в небольших котлах и сковородках на ТП 22 (участки в, з-и и др., см. рис. 2). Образование мельниковита происходит, по мнению ряда исследователей, в более щелочной среде, чем пирита, и происходит в условиях слабо восстановительной среды, что ведёт к более низкому, чем в пирите, соотношению  $\text{Fe} : \text{S}$ . Со временем мельниковит переходит в пирит.

Метастабильные тонкодисперсные фазы макинавит, канзит, мельниковит со временем переходят в стабильный янокристаллический пирит. Обра-

зование этих тонкодисперсных фаз типично для первичных осадков в зонах разгрузки глубинных горячих минерализованных вод [4].

#### Оксиды и гидроксиды.

На КДВЦ *железистые осадки из близнеитральных вод*, представлены преимущественно сидерогелем, гётитом и гидрогётитом. На устьях холодных и теплых близнеитральных источников осаждаются *сидерогель*, переходящий со временем в *гидрогётит* и *гётит*. Два последних минерала часто образуются на устьях горячих источников с температурой  $90\text{--}97^\circ\text{C}$ .

**Сидерогель** в кратере вулкана Старый Кихпиньч осаждается на устьях тёплых источников на ТП 1 ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ), ТП 2 ( $T = 37\text{--}39^\circ\text{C}$ ) (на ТП 3 — в отдельные годы), образуя иногда «плащи» в  $n \cdot 10\text{ м}^2$ . Истоком ручья Короткий Ключ (ТП 21) являются источники, на устьях которых осаждаются железистые осадки, расположены они на высоте 1–1,5 м над урезом воды, в западной стенке каньона (юго-восточный склон сопки Жёлтой). В августе 1981 г. в промоине снежника на расстоянии около 100 м от истока галька в ручье была покрыта сидерогелем до 1 см мощностью, вода в промоине имела  $T = 16^\circ\text{C}$ , что свидетельствует о высокой температуре источников. В истоках реки Гейзерной «плащи» сидерогеля образуются на устьях тёплых ( $24\text{--}29^\circ\text{C}$ ) источников на ТП 8, ТП 9, ТП 10. В среднем течении ручья Прозрачного (ТП 13) по берегам выходит группа теплых ( $37^\circ\text{C}$ ) источников, на устьях которых осаждаются сидерогель. Источники с  $T \sim 29^\circ\text{C}$  имеются в правом борту реки (почти на уресе воды) и на середине крутого склона (источник Неожиданный), окружённые «плащами» сидерогеля (ТП 14). Когда вода этого источника достигает уреза воды р. Гейзерной, на крупных глыбах осаждаются кальцит. Тёплые источники с «плащами» сидерогеля на устье встречаются и на ТП 22 (участки: а, з, и, к; см. рис. 2).

Холодные источники, на устьях которых сидерогель образует «плащи» в  $n \cdot 10\text{ м}^2$ , расположены у подножия сопки Жёлтой (ТП 16 и ТП 17). На ТП 22 (участок а, ручей Кровавый) находится группа из 5–7 холодных источников, устья которых окружены небольшими куполами, образованными сидерогелем (диаметром в основании до 2,5 м, высотой до 1 м). Маломощный осадок образуется на устьях холодных источников в верховьях ручья Извилистого (ТП 27, см. рис. 1). В этих источниках самое высокое значение  $\text{pH} = 9,25$ .

**Гётит и гидрогётит** образуются на устьях горячих источников на ТП 22 (см. рис. 2, участки: б, в, з, и, к). До обрушения 1982 г. на ТП 3 был горячий источник, на устье и по руслу которого осаждался гётит и гидрогётит. После августовского землетрясения 1983 г. у южного подножия сопки Жёлтой возник источник Новый (ТП 17,  $T = 83^\circ\text{C}$ ), осадок представлен гётитом.

В районе каньона «Щёки» (ТП 5), в правом борту, на высоте около 1,5–2 м над руслом ручья, был скальный выход с гротом, высота которого 2,5–3 м, площадь пола  $\sim 3 \times (4 - 5)$  м. Свод и пол ниши выполнены оксидами и гидроксидами железа, состоящими из маггемита, гётита и гидрогётита (данные рентгеновского анализа). Морфологические формы железистого осадка в нише в виде сталактитов и сталагмитов (высотой до 20 см), свидетельствуют о том, что в отдельные периоды со свода вода сочилась по каплям, но в 1981 г. на момент посещения в гроте было сухо. Грот образован в скале, сложенной конгломератом, цементом в котором служит чистейший галлуазит. Лахары [5], которые были в период 1983–1997 гг., перекрыли этот многометровый щелевидный каньон.

На границе тундры и восточного склона постройки вулкана Старый Кихпинич, при выходе ручья Кислого из щелевидного каньона «Щёки» (см. рис. 1), в русле существовал водопад высотой более 3–4 м, где водопором служил горизонт конгломерата, цементом в котором являлся лимонит. Мощность этого горизонта была более 0,5 м. Для исследования этот горизонт был недоступен. Этот участок оказался также погребён под материалом вышеупомянутых лахаров.

В отдельные годы русло ручья Кислого на протяжении  $\sim 10$ –11 км, вплоть до впадения в реку Светлую, было покрыто тонким слоем плотного железистого осадка (обр. 1047 б, см. табл. 1, 2) представленного гётитом, гидрогётитом, аморфным кремнезёмом, алунином, ярозитом, гипсом.

В средней части поля ТП 12 (см. рис. 1), берущего начало на западном склоне сопки Жёлтой, находится брекчия мощностью 0,4–0,5 м, цементом в которой служат гидроксиды железа. Эта брекчия является водопором и также образует водопад, и только здесь, в русле ручья она обнажается. На участках, расположенных выше водопада было несколько источников ( $D < 0,5$  л/с.), на устьях которых осаждался сидерогель, а ниже водопада находилась группа таких же небольших источников, но с осадком аморфной серы на устьях.

**Карбонаты железа** Сидерит осаждается с сидерогелем и тешемахеритом на устьях источников на правом берегу реки Гейзерной (см. рис. 1, ТП 14), расположенных ниже источника Неожиданный и в истоках реки Мутной (ТП 7). О его наличии в осадке свидетельствует только расчёт химического анализа.

**Фосфаты железа** достаточно редки в исследуемом районе. Минералы этой группы осаждаются из субщелочных вод, содержащих ион  $\text{HCO}_3^-$ . Фосфаты встречаются в качестве второстепенных минералов: вивианит и продукты его окисления с кальцитом (ТП 9), дельвоксит с сидерогелем (ТП 1 и ТП 9), в ассоциации с гётитом встречаются рокбриджит и дестинезит на ТП 9. Наиболее разнообразны фосфаты железа на ТП 9 — вивианит,  $\beta$ -керченит, бобье-

рит, рокбриджит, штрэнгит, дельвоксит, фронделит и дестинезит. На ТП 3 фосфаты представлены рокбриджитом, на ТП 5 — дестинезитом.

На ТП 9 в  $\sim 50$  м от устья источника в шурфе на глубине 10 см в травертине был встречен вивианит. Травертин представлен слоистым зеленоватым кальцитом, быстро приобретающим на воздухе охристый цвет. Зеленоватый цвет травертина свидетельствует о восстановительных условиях в месте отбора образца. Минерал встречен в виде отдельных шестоватых кристаллов (длиной до 3 мм), а также в сростках. В свежем образце минерал прозрачный и бесцветный, приобретающий быстро, буквально на глазах, голубой цвет, затем индигово-синий. Минерал хрупкий, имеющий стеклянный блеск.  $N_g = 1,632 \pm 0,002$ ;  $N_p = 1,600 \pm 0,002$ ; подтверждён рентгеновским анализом. Наличие бобьерита и ковдорсита в продуктах окисления вивианита свидетельствует о вхождении Mg в состав вивианита в качестве изоморфной примеси. Промежуточным продуктом выветривания вивианита является  $\beta$ -керченит. Диагностированы рентгеновским методом также дюфренит (краурит), дестинезит, рокбриджит. В последнем минерале существует совершенный изоморфизм между Fe и Mn. Крайние члены этого ряда фронделит (Mn > Fe) и рокбриджит (Fe > Mn). Дельвоксит определён только термическим методом.

**Сульфаты железа** представлены минералами группы ярозита: K-Na-,  $\text{H}_3\text{O}$ - и  $\text{NH}_4$ -ярозиты, которые образуются из кислых сульфатных вод с высоким содержанием железа. Эти минералы встречаются в осадках практически везде, где идёт осаждение из кислых сульфатных вод с высоким содержанием железа. В осадках с сульфатами железа можно выделить две парагенетические ассоциации.

**Первая ассоциация** встречается в кратере СК на ТП 1 (западная площадка), в зоне слияния всех истоков ручья Кислого в один (обр. 896 б-в), на ТП 6 (обр. 912, 913). Она имеет характерные термические кривые ДТА [7, 9]: глубокий крутой эндотермический пик (–) 235 – 255° С, затем крутой острый экзотермический пик (+) 565 – 580° С и глубокий второй эндотермический пик (–) 755 – 795° С (см. рис. 3). Пересчёт химического состава осадка на минеральный состав показывает (табл. 3), что более половины составляют гётит и гидрогётит, около 10% приходится на алунит (K-Na или  $\text{H}_3\text{O}$ ) и более 20% — ярозит, в основном,  $\text{H}_3\text{O}$ -ярозит, иногда присутствует опал или гипс. Осадки окристаллизованы слабо, но присутствие алунита и ярозита подтверждают данные анализов — рентгеновского и термического. Эта группа осадков осаждается из кислой ( $\text{pH} < 3$ ) холодной ( $T < 16^\circ \text{C}$ ) сульфатной воды, соотношение катионов в которой такие:  $\text{Ca} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{H} \sim \text{Fe} > \text{Na} \sim \text{NH}_4 > \text{K}, \text{Mn}$ .

**Вторая ассоциация** представлена железистыми осадками ТП 3 с характерными кривыми ДТА [7, 9], на которых наблюдается эндопик (–) 200 – 250° С,

за ним экзопик (+) 350 – 450° С и двойной эндопик в области (–) 770 – 865° С. Первые два пика аналогичны таковым для геля аморфной гидроокиси железа, последний эндопик характерен для аморфной разности алуниита – левигита. Первый эндопик соответствует аморфной гидроокиси железа, второй эндопик указывает на процесс десульфатизации, экзопик свидетельствует о явлении рекалесценции или самораскалывания (эффект Берцелиуса). Причиной самораскалывания является выделение энергии в виде тепла при быстрой кристаллизации аморфной гидроокиси железа в интервале температур 380–550° С [16]. Для геля аморфной гидроокиси железа является характерным наличие выраженного экзотермического пика (+) 300 – 340° С вслед за глубоким эндотермическим пиком (–) 170 – 200° С. Чем выше содержание иона  $\text{HCO}_3^-$ , тем выше и чётче пик, отвечающий за рекалесценцию. Осаждение осадка происходит из сульфатной воды, из катионов Са преобладает, часто близко к нему содержание Fe и Mg, несколько меньше – Al. Известно, что «в слабо разбавленных растворах устойчив комплекс  $[\text{FeHSO}_4]^+$ , в разбавленных – аквакомплексы типа  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^+$ . В обстановке разбавления растворов и некоторого увеличения щёлочности происходит окисление и гидролиз катионов, приводящий к выпадению гидроокислов железа, обычно в форме гётита или гидрогётита, или того и другого одновременно. При этом гидролиз и параллельное окисление закисного железа способствуют совместной кристаллизации гётита с основными сульфатами трёхвалентного железа (ярозит)» [14].

### Заключение

Условия, при которых образуются железистые осадки в районе КДВЦ, очень разнообразны. Разброс значений pH, при которых осаждаются эти осадки, значителен (от 2,67 до 9,25), также, как и температур (от <16 до 97–98° С).

По составу осадков и условиям осаждения из вод эти осадки можно разделить на три группы. Однотипные осадки по всему водотоку (сидерогель, гётит и гидрогётит) – это *первая группа* (ТП 1, ТП 22 и др.). *Вторая* – осадки, образующиеся на устье источника, далее по ходу водотока сменяются другими при изменении параметров системы (pH, Eh, температуры,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ). Так сидерогель переходит в карбонатный осадок (арагонит, кальцит) на ТП 2 и ТП 14, а сульфурит – в гидроксид (ТП 12). *Третья* – железистые осадки, образующиеся при смешении водотоков резко различного состава (ТП 7).

Железистые осадки представлены такими минеральными классами: *сульфиды* (пирит, марказит, мельниквит, пирротин, макинавит, канзит); *окислы и гидроокислы* (сидерогель, гётит, гидрогётит, лепидокрокит, гематит, маггемит); *сульфаты* (K-Na-,  $\text{NH}_4$ - и  $\text{H}_3\text{O}$ -ярозиты), *фосфаты* (вивианит, дельвоксит, фронделит, дестинезит и др.); *карбонаты* (сидерит).

### Список литературы

1. Белоусов В. И. Геология гидротермальных полей в областях современного вулканизма М.: Наука, 1978. 137 с.
2. Брайцева О. А., Флоренский И. В., Волынец О. Н. Вулкан Кихпиньч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 72–91.
3. Брайцева О. А., Флоренский И. В., Пономарёва В. В. и др. История активности вулкана Кихпиньч в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 3–19.
4. Булах А. Г. Общая минералогия. СПб.: Изд-во С.-Петербург. Ун-та, 1999. 356 с.
5. Влодавец В. И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984, 339 с.
6. Геохимия ландшафтов рудных провинций. М.: Наука, 1982, 261 с.
7. Иванова В. П., Касатова В. Н., Красавина Т. Н., Розина Е. Л. Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. 399 с.
8. Карданова О. Ф., Казьмин Л. А. Условия образования глинозёмистых осадков в зоне смешения кислых и субщелочных водотоков в истоках реки Мутной // Материалы Ежегодной конференции, посвящённой дню вулканолога 28–31 марта 2007 г. Петропавловск-Камчатский, 2007, С. 213–227.
9. Кашкай М. А. Алунииты, их генезис, использование. М.: недра, 1970. Т. 1. 400 с.
10. Костов И. Минералогия. М.: Мир, 1971. 584 с.
11. Лазаренко Е. К. Курс минералогии. М.: Высшая школа, 1963. 559 с.
12. Лебедев Л. М. Минералы современных гидротерм. М.: Наука, 1979, 200 с.
13. Набоко С. И. Металлоносность современных гидротерм в областях тектономагматической активности. М.: Наука, 1980. 199 с.
14. Постникова В. П., Яхонтова Л. К. Минералогия зоны гипергенеза оловорудных месторождений Комсомольского района. Владивосток.: ДВНЦ АН СССР, 1984. 124 с.
15. Стацук М. Ф. Проблема окислительно-восстановительного потенциала в геологии. М.: Недра, 1968. 208 с.
16. Чухров Ф. В. Коллоиды в земной коре. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 671 с.