

УДК 553.2.065 (261.1)

**В.И. Силаев<sup>1</sup>, И.Г. Добрецова<sup>2</sup>, А.И. Антошкина<sup>1</sup>,  
В.Н. Филиппов<sup>1</sup>, Б.А. Макеев<sup>1</sup>, И.В. Смолева<sup>1</sup>, А.Ф. Хазов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

<sup>2</sup>АО «Полярная морская геологоразведочная  
экспедиция», г. Санкт-Петербург

## ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СУЛЬФИДНЫЕ ОРУДЕНЕНИЯ В РОССИЙСКОМ РАЗВЕДОЧНОМ РАЙОНЕ СРЕДИННО- АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

Рассмотрены результаты новых исследований сульфидных оруденений с рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта. Проанализированы закономерности химического и минерального состава, особенности минералогической зональности в локальном и региональном масштабах. Обсуждаются генетические аспекты изотопного состава серы и углерода в продуктах океанического и континентального вулканизма.

*Ключевые слова:* Срединно-Атлантический хребет, гидротермальные сульфидные поля, химический и минеральный состав оруденений, изотопия серы и углерода в продуктах океанического и континентального вулканизма.

**DOI: 10.17072/chirvinsky.2022.226**

**Введение.** В октябре 2012 г. между Российской Федерацией и Международным органом по морскому дну (МОМД ООН) был подписан контракт на проведение разведки гидротермальных сульфидных полей в рифтовой долине Срединно-Атлантического хребта (САХ) в секторе с координатами 12°48'–20°54' с. ш. и на глубинах 2–4 км в течение 15 лет. В рамках этого соглашения Россия является обладательницей эксклюзивных прав на изучение и дальнейшее освоение многочисленных гидротермальных сульфидных месторождений [1, 12, 15, 16, 21, 28], выявленных в пределах Российского разведочного района (РРР). Поисково-разведочные работы в этом районе проводит, главным образом, Полярная Морская ГРЭ (Санкт-Петербург).

**Общая характеристика сульфидных оруденений.** Гидротермальные сульфидные проявления выявлены в САХ в пределах рифтовой долины на восточном и западном ее бортах, а также за пределами рифтовой зоны. В настоящее время эти проявления подразделяют на два типа [4–6]. К первому типу относят трубообразные сульфидные постройки – так называемые черные курильщики, образовавшиеся на

выходах на поверхность пульсирующих высоконапорных и относительно высокотемпературных (до 350°C) флюидов. В качестве субстрата для сульфидных труб выступают серпентинизированные габбро-перидотиты, пироксениты, пикробазальты [7, 14, 21, 25]. В качестве второго – «нового» – типа рассматриваются более мелкие, но множественные постройки, возникшие в результате воздействия на рыхлые органогенно-карбонатные и глинисто-карбонатные осадки слабонапорных и относительно низкотемпературных флюидов. Примером такого типа сульфидных построек могут служить минерализации на гидротермальных полях Петербургском и Зенит-Виктория. Считается, что оба типа сульфидных проявлений генетически обусловлены флюидами «глубинной циркуляции» [19], а образование рассматриваемых оруденений в них происходило как последовательный почти непрерывный процесс, хронологически протекающий в диапазоне от примерно 200 тыс. лет н. (уран-ториевый метод) до практически современности [26].

В составе оруденений обоих типов выявлены пирит, марказит, пирротин, изокубанит, халькопирит, борнит, халькозин-ковеллин, сфалерит, сульфаты, изредка встречается самородная медь [3, 11, 19]. Отмечается также значительное обогащение таких оруденений золотом от 1–5 до 60 г/т, серебром от 6 до 360 г/т и сульфидов платиной до 500 г/т [14, 19, 21, 22, 24]. В последние годы установлено, что визуально эффективным минералогическим спутником таких оруденений выступает благодаря яркому голубовато-зеленому цвету атакамит, пропитывающий вмещающие сульфидные постройки осадки и образующий на сульфидах совместно с гётитом и арагонитом эпигенетические корки [9, 10].

Полученные по черным курильщикам САХ данные свидетельствуют об упорядоченном в пространстве и времени развитии процесса сульфидообразования. Так, на примере гидротермального поля Снейк-Пит было показано [20], что в пределах сульфидных труб реализуется довольно отчетливая вертикальная (вдоль оси) и латеральная (в стороны от оси) минералогическая зональность. Вертикальный вариант зональности проявляется в пространственной последовательности расположения рудообразующих сульфидов в направлении снизу вверх: (изокубанит + халькопирит) → (халькопирит + пирит (марказит) → (сфалерит + халькопирит). В латеральном направлении аналогичная последовательность имеет вид: (изокубанит + халькопирит) → сфалерит → ранний пирит (марказит). Примечательно, что выявленная в трубах поля Снейк-Пит зональность-последовательность образования рудообразующих сульфидов близка к генеральной зональности-последовательности

сульфидообразования в гидротермальных полях САХ [26]: (пирит + марказит) → (пирит + марказит + халькопирит) → (халькопирит + борнит + халькозин-ковеллин) → сфалерит. Более того, выявленная в океанических сульфидных оруденениях зональность-последовательность имеет сходство с таковой в континентальных гидротермальных палеосистемах [23]. В последних наиболее ранним минералом и рассеянным по системе также выступает пирит, сменяющийся во времени сначала медными сульфидами, а затем сфалеритом и далее галенитом.

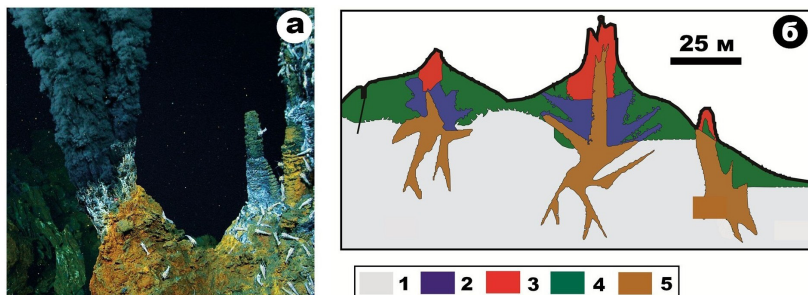


Рис. 1. Пример черного курильщика (а) и схема минералогической зональности курильщиков (б), составленная на основе результатов изучения рудного поля Снейк-Пит [20]. Легенда на б: 1 – базальты, 2 – пирит-халькопиритовые руды, 3 – сфалеритовые руды, 4 – ранний пирит, 5 – корневые изокубанит-халькопиритовые руды

Объекты и результаты исследований. Объектами наших исследований послужили типичные образцы с относительно недавно открытых и еще мало изученных гидротермальных полей, представляющих все основные разновидности океанических сульфидных руд (табл. 1). Изученные образцы характеризуются полисульфидным составом, массивно-пористой и гнездово-прожилко-вкрапленной текстурой, тонкозернистой структурой. В некоторых образцах наблюдается зональность в распределении основных сульфидов, выражающаяся в некотором пространственном обособлении продуктивных сульфидов меди и цинка от пирита-марказита (рис. 2).

Доля сульфидной массы в исследованных образцах колеблется в пределах от 26 % (Семенов, Краснов) до 82 % (Петербургское), составляя в среднем  $56.3 \pm 17.9$  %. По химическому составу (табл. 2) исследованные образцы можно подразделить на шесть разновидностей: **Fe (Co, Zn)** – Победа 1, Краснов; **Cu-Fe (Co, Ni, Zn)** – Ашадзе 2, Семенов; **Fe-Cu (Co, Ni)** – Ашадзе 1, Петербургское; **Zn-Fe-Cu (Co)** – Молодежное; **Fe-Zn-Cu (Co, Pb)** – Коралловое; **Cu-Fe-Zn (Co, Ni, Pb)** – Зенит-Виктория. Корреляционный анализ компонентов химического состава выявил в

образцах несколько групп компонентов, связанных между собой в группах и конкурирующих с компонентами других групп.

Таблица 1

*Общая характеристика сульфидных руд*

№ п/п	Рудное поле, гео-графические координаты, глубина отбора образцов	Минеральный тип	Доля рудной массы, мол. %	Диагностированные минералы
1	Ашадзе-1, 12°58', 3700 м	Изокубанит-халькопиритовый	60.6	Группа халькозина Cu <sub>2</sub> -xS, борнит, халькопирит, изокубанит CuFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , шпинелид, ангидрит, гипс, сидерит, гётит
2	Ашадзе-2, 12°59' с. ш., 44°54' з. д., 3280–4300 м	Пирит-халькопиритовый	60.0	Пирит, марказит, халькопирит, гипс, гётит
3	Петербургское, 19°52' с. ш., 45°55' з. д., 2954–2997 м	Сфалерит-борнит-халькопиритовый	81.7	Халькопирит, борнит, сфалерит, пирит
4	Победа-1, 17°07' с. ш., 46°24' з. д., 2790–3003 м	От халькопирит-пиритового до пирит-халькопиритового	67.8	Пирит, марказит, халькопирит
5	Коралловое, 13°07'–13°09' с. ш., 44°52'–44°54' з. д., 3384–3493 м	Халькопирит-пиритовый	68.3	Пирит, халькопирит, сфалерит, тальк, гидрослюда, хлориты, галит
6	Семёнов-2, 13°30' с. ш., 44° з. д., 2400–2950 м	Сфалерит-халькопиритовый	26.5	Пирит, халькопирит, самородная медь, атакамит, тальк
7	Молодежное, 13°07' с. ш., 44°54' з. д., 2779–2849 м	Пирит-халькопиритовый с изокубанитом	50.6	Пирит, халькопирит, изокубанит, сфалерит
8	Краснов, 16°38' с. ш., 3700–3760 м	Халькопирит-пиритовый	27.0	Пирит, халькопирит, кварц
9	Зенит-Виктория, 20°08' с. ш., 2370–3760 м	Сфалеритовый	68.3	Сфалерит, халькопирит, хлориты
10	ТАГ, 26° с. ш.	Халькопирит-пиритовый	52.6	Пирит, марказит, халькопирит, гётит, кварц

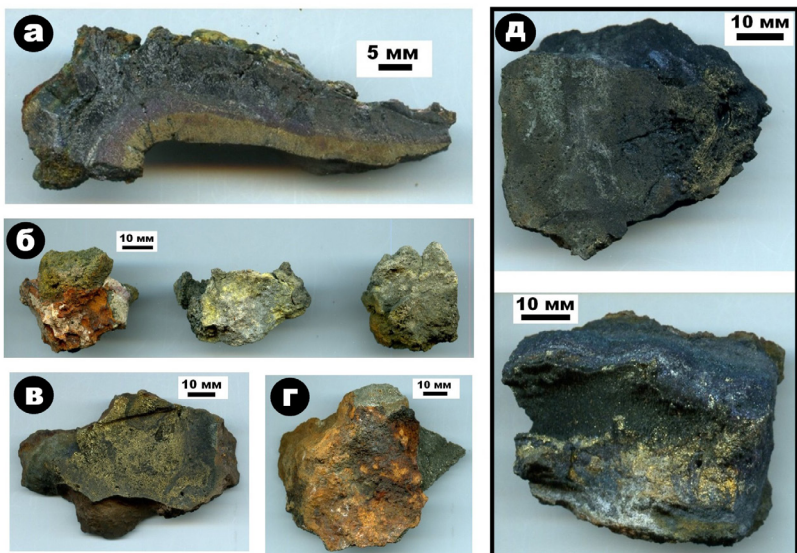


Рис. 2. Типичные примеры исследованных образцов океанических сульфидных руд: а – Ашадзе 1, б – Ашадзе 2, в – Петербургское, г – Победа 1, д – Коралловое

1. Компоненты вулканической примеси в рудах:  $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{PbO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{MnO} + \text{SrO} + \text{BaO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{MoO}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{As}_2\text{O}_5 + \text{Cl}$ . Положительные коэффициенты парной корреляции здесь варьируются в пределах 0.23–0.59.

2. Компоненты магнетита в вулканическом материале:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{MnO}$ . Коэффициенты парной корреляции разного знака лежат в пределах значений 0.2–0.27.

3. Компоненты сульфидного оруденения:  $\text{Fe} + \text{Cu} + \text{Ni} + \text{Co} + \text{Zn} + \text{S} + \text{Se}$ . Коэффициенты парной корреляции разного знака в пределах 0.2–0.6. Внутри сульфидной группы выявляется три отрицательно коррелирующихся между собой подгруппы сульфидных компонентов: 1)  $\text{Fe} + \text{Co} + \text{Ni}$  с положительными коэффициентами корреляции в пределах 0.27–0.58 (пирит, марказит); 2)  $\text{Cu} + \text{Se}$  с положительными коэффициентами корреляции в пределах 0.29–0.54 (медные сульфиды); 3)  $\text{Zn}$  (сфалерит). Существование такой системы подгрупп подчеркивается сильными отрицательными корреляциями между основными сульфидными компонентами:  $\text{Fe}/\text{Cu} = -0.57$ ;  $\text{Fe}/\text{Zn} = -0.36$ ;  $\text{Cu}/\text{Zn} = -0.56$ . Очевидно, что вся система корреляционных связей в рассматриваемой группе отражает конкуренцию между соответствующими сульфидами – пиритом + марказитом, изокубанитом + халькопиритом + борнитом, сфалеритом.

Таблица 2

## Статистические данные о химическом составе сульфидных руд

Компо- ненты	Рудные поля								
	Ашадзе 1	Ашадзе 2	Петербург- ское	Победа 1	Коралловое	Семенов	Молодеж- ное	Краснов	Зенит- Виктория
SiO <sub>2</sub>	1.08 ± 0.8	3.3 ± 4.65	7.87 ± 1.08	2.71 ± 1.32	12.14 ± 13.13	28.29 ± 38.96	25.43 ± 0.91	37.59 ± 19.02	6.18 ± 3.39
TiO <sub>2</sub>	0	0.004 ± 0.005	0	0.003 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.03	0.03 ± 0.04
SnO <sub>2</sub>	0.03 ± 0.07	0.03 ± 0.07	0	0	0.05 ± 0.11	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24 ± 0.1	0.53 ± 0.28	0.17 ± 0.02	0.561 ± 0.35	0.241 ± 0.17	0.74 ± 0.85	0.66 ± 0.23	1.63 ± 1.39	1.65 ± 1.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.28 ± 5.08	43.38 ± 6.81	24.95 ± 1.89	43.38 ± 3.91	13.37 ± 5.7	20.37 ± 21.85	16.84 ± 2.62	28.41 ± 18.69	17.47 ± 2.58
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-	0.01 ± 0.01	0	0.02 ± 0.02	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.06	0	0.04 ± 0.03	0
MnO	0.04 ± 0.09	0.05 ± 0.1	0	0.05 ± 0.03	0.06 ± 0.05	0.02 ± 0.03	0.02 ± 0.01	0.15 ± 0.27	0.07 ± 0.1
NiO	1 ± 0.68	0	0	0	0	0.03 ± 0.04	0	0	0.04 ± 0.02
CoO	0.29 ± 0.06	0.18 ± 0.18	0	0	0.01 ± 0.02	0.16 ± 0.23	0.05 ± 0.01	0.1 ± 0.07	0.06 ± 0.01
CuO	35.32 ± 7.44	7.72 ± 2.75	29.49 ± 2.35	0.84 ± 0.57	23.28 ± 0.57	9.79 ± 11.6	24.57 ± 5.9	1.35 ± 2.32	2.55 ± 0.52
ZnO	0.1 ± 0.05	1.74 ± 1.84	0.07 ± 0.02	0.1 ± 0.09	17.01 ± 13.69	0.17 ± 0.12	2.44 ± 0.82	0.21 ± 0.31	33.99 ± 4.6
PbO	0	0	0	0	0.03 ± 0.08	0	0	0	0.01 ± 0.01
MgO	0.97 ± 0.96	2 ± 1.02	0.68 ± 0.18	0.97 ± 0.22	0.56 ± 0.51	17.76 ± 19.83	0.58 ± 0.11	2.23 ± 2.6	2.02 ± 0.78
CaO	5.71 ± 4.55	4.27 ± 5.87	0.12 ± 0.04	0.15 ± 0.05	0.16 ± 0.01	1.28 ± 0.4	0.19 ± 0.13	3.11 ± 5.83	0.11 ± 0.07
SrO	0.03 ± 0.03	0.03 ± 0.04	0	0	0	0.02 ± 0.02	0	0.05 ± 0.09	0
BaO	0	0	0	0	0	0	0	0.55 ± 1.1	0
Na <sub>2</sub> O	1.13 ± 0.54	1.35 ± 0.8	0.53 ± 0.2	0.96 ± 0.59	0.3 ± 0.5	0.68 ± 0.06	1.48 ± 0.01	0.93 ± 0.24	0.1 ± 0.02
K <sub>2</sub> O	0.04 ± 0.02	0.08 ± 0.03	0.04 ± 0.01	0.09 ± 0.04	0.14 ± 0.31	0.05 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.19 ± 0.16	0.03 ± 0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06 ± 0.08	0.26 ± 0.29	0.03 ± 0.04	0.07 ± 0.05	0.01 ± 0.02	0.15 ± 0.21	0.01 ± 0.004	0.31 ± 0.51	0.01 ± 0.003
SO <sub>3</sub>	26.4 ± 4.38	34.85 ± 13.92	35.84 ± 2.76	49.31 ± 4.3	32 ± 4.95	19.58 ± 25.96	26.99 ± 2.12	22.76 ± 15.88	35.46 ± 2.56
MoO <sub>3</sub>	0	0	0	0.05 ± 0.03	0	0	0	0.04 ± 0.08	0
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0.06 ± 0.06	0	0	0.01 ± 0.01	0	0	0	0
SeO <sub>2</sub>	0.06 ± 0.02	0.004 ± 0.009	0.03 ± 0.04	0	0.01 ± 0.07	0	0.05 ± 0.01	0	0
Cl	0.26 ± 0.07	0.64 ± 0.58	0.23 ± 0.33	0.24 ± 0.41	0.45 ± 0.4	0.19 ± 0.27	0.006 ± 0.0023	0.31 ± 0.03	0.2 ± 0.22

Важно также подчеркнуть, что между компонентами сульфидного оруденения и вулканической примеси выявляются устойчивые отрицательные коэффициенты парной корреляции, значения которых колеблются в пределах от  $-0.2$  до  $-0.52$ . Это, скорее всего указывает на наложенный характер сульфидного оруденения.

Фазовая диагностика минералов в составе сульфидных оруденений в основном осуществлялась рентгендифракционным методом по наиболее характерным отражениям ( $d/n$  в Å, в круглых скобках – индексы  $hkl$ , в квадратных – параметры э. я. в Å). Учитывая природную уникальность исследованных объектов, ниже приводим рентгеновские данные по всем проанализированным минералам.

*Пирит*: 3.12–3.13 (111); 2.7–2.71 (200); 2.42 (210); 2.21 (211); 1.911–1.916 (220); 1.631–1.634 (311); 1.562–1.570 (222); 1.501–1.503 (230); 1.447–1.448 (321); 1.242–1.243 (331); 1.211 (420) [ $a_0 = 5.4166 \pm 0.0003$ ].

*Марказит*: 3.44–3.46 (110); 2.69 (101); 2.31–2.32 (120); 1.915 (121); 1.757–1.761 (211); 1.720–1.725 (220); 1.681–1.690 (002); 1.672–1.674 (130); 1.596–1.597 (031); 1.428 (310); 1.367 (122) [ $a_0 = 4.446 \pm 0.012$ ,  $b_0 = 5.422 \pm 0.014$ ;  $c_0 = 3.382 \pm 0.009$ ].

*Халькопирит*: 3.03–3.04 (112); 2.64–2.65 (020); 1.868–1.871 (220); 1.852–1.857 (024); 1.591–1.593 (132); 1.570–1.576 (116); 1.518–1.520 (224); 1.322–1.323 (040); 1.302 (008); 1.211–1.215 (332); 1.205 (136) [ $a_0 = 5.2887 \pm 0.0004$ ;  $c_0 = 10.4172 \pm 0.0012$ ].

*Борнит*: 4.07 (105); 3.29–3.30 (116); 3.15–3.16 (224); 2.80–2.81 (305); 2.73–2.74 (008); 2.49–2.5 (413); 2.10–2.11 (336); 1.854–1.858 (2 1 11); 1.645–1.649 (2 2 12); 1.578 (448) [ $a_0 = (10.92–10.96) \pm 0.02$ ;  $c_0 = (21.89–21.91) \pm 0.04$ ].

*Изокубанит*: 3.05 (111); 2.64–2.65 (200); 1.865–1.872 (220); 1.591–1.595 (113); 1.321–1.324 (400) [ $a_0 = (5.2810–5.2901) \pm 0.0006$ ].

*Халькозин*: 4.24 (22 $\bar{2}$ ); 3.75 (122); 3.59 (212); 3.39 (400); 3.29 (032); 3.18 (222); 3.03 (132); 2.95 (51 $\bar{2}$ ); 2.88 (041); 2.83 (033); 2.73 (240); 2.66 (042); 2.56 (241); 2.53 (60 $\bar{2}$ ); 2.47 (61 $\bar{2}$ ); 2.39 (043); 2.33 (44 $\bar{1}$ ); 2.24 (025); 2.21 (31 $\bar{6}$ ); 2.12 (044); 2.10 (25 $\bar{3}$ ); 2.05 (053); 2.03 (72 $\bar{2}$ ); 2.00 (144); 1.969 (060); 1.959 (630); 1.936 (450); 1.873 (13 $\bar{6}$ ); 1.814 (26 $\bar{3}$ ); 1.784 (154); 1.697 (434); 1.688 (40 $\bar{8}$ ); 1.650 (702); 1.617 (524); 1.579 (75 $\bar{4}$ ) [ $a_0 = 15.21 \pm 0.04$ ;  $b_0 = 11.87 \pm 0.03$ ;  $c_0 = 13.51 \pm 0.06$ ;  $\beta = 116.4 \pm 0.3$ ].

*Сфалерит*: 3.13 (111); 2.71–2.72 (200); 1.914–1.917 (220); 1.633–1.635 (311); 1.563–1.566 (222); 1.353 (400); 1.241 (331); 1.210 (420) [ $a_0 = 5.417 \pm 0.004$ ].

Шпинелид: 4.83–4.84 (111); 2.96–2.97 (220); 2.53 (311); 2.42 (222);



2.10 (400); 1.695–1.711 (422); 1.614–1.616 (333); [ $a_0=(8.380-8.388) \pm 0.006$ ].

*Ангидрит*: 3.49–3.50 (002); 2.84–2.85 (210); 2.80 (121); 2.47 (022); 2.32–2.33 (202); 2.21 (212); 2.18 (103); 2.09–2.10 (113); 1.993 (301); 1.858–1.866 (230); 1.747–1.748 (004); 1.647–1.648 (232); 1.564 (024). [ $a_0=6.23 \pm 0.02$ ;  $b_0=7.00 \pm 0.03$ ;  $c_0=6.993 \pm 0.014$ ].

*Гипс*: 7.59–7.63 (020); 4.28–4.29 (021); 3.79–3.81 (040); 3.16 (111); 3.07 (041); 2.78–2.80 ( $11\bar{2}$ ); 2.68–2.70 (150); 2.49 ( $20\bar{2}$ ); 2.45 (022); 2.39 ( $24\bar{1}$ ); 1.965 ( $31\bar{2}$ ); 1.898 ( $\bar{2}60$ ); 1.811 (062); 1.78 ( $26\bar{2}$ ); 1.69 (023); 1.666 ( $24\bar{3}$ ); 1.647 (261) [ $a_0=6.29 \pm 0.04$ ;  $b_0=15.18 \pm 0.03$ ;  $c_0=5.68 \pm 0.02$ ;  $\beta=114.3$ ].

*Сидерит*: 3.59 (012); 2.79 (104); 2.36 (110); 1.964 (202) [ $a_0=4.71 \pm 0.04$ ;  $c_0=15.3 \pm 0.3$ ].

*Гетит*: 5.00 (020); 4.18 (110); 3.37 (120); 2.69 (130); 2.58 (021); 2.53 (101); 2.49 (040); 2.45 (111); 2.25 (121); 2.19 (140) [ $a_0=4.601 \pm 0.010$ ;  $b_0=9.978 \pm 0.015$ ;  $c_0=3.021 \pm 0.009$ ].

Кроме этого, по составу в исследованных образцах определены самородная медь и атакамит.

На основании полученных данных сульфидные проявления можно подразделить на следующие минералогические типы: *изокубанит-халькопиритовый* (Ашадзе 1), *пирит-халькопиритовый* (Ашадзе 2, Молодежное), *халькопирит-пиритовый* (Победа 1, Коралловое, Краснов, ТАГ), *сфалерит-борнит-халькопиритовый* (Петербургское), *сфалерит-халькопиритовый* (Семенов), *сфалеритовый* (Зенит-Виктория). Таким образом, проанализированная коллекция образцов минералогически перекрывает практически весь диапазон вариаций состава океанических сульфидных оруденений.

**Генетический аспект изотопного состава серы и углерода.** Изотопный состав рудообразующих элементов имеет фундаментальное значение для генетических интерпретаций. В нашем случае анализировалась изотопия серы в сульфидах и углерода, присутствующего в дисперсно-рассеянной форме в магматитах и оруденениях, а также в концентрированной форме углеродизированных шлаков.

Как известно, изотопный состав серы в природных объектах варьируется относительно метеоритного стандарта в пределах от  $-50$  до  $70$  ‰ (рис. 3). При этом считается, что в области отрицательных значений изотопного коэффициента источником серы в сульфидах является  $H_2S$ , а в области положительных значений – сульфаты. Известно также, что в сульфидных месторождениях с мантийным источником вещества сера по изотопному составу более или менее сближается с метеоритным стандартом, а в месторождениях с коровым источником вещества сера



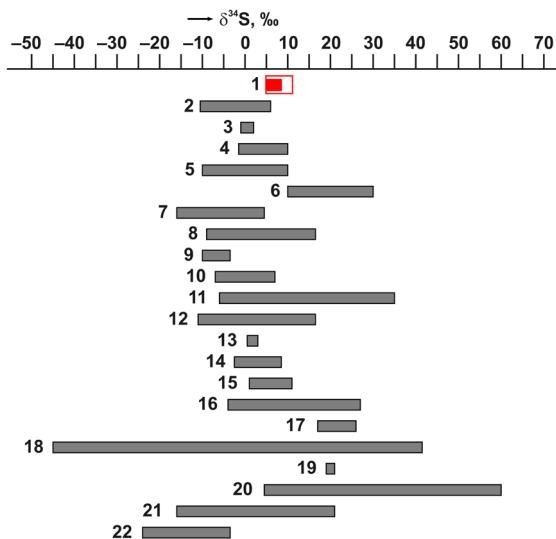


Рис. 3. Изотопный состав серы в природных объектах: 1 – океанические сульфидные руды, рудное поле Ашадзе, красной рамкой показаны данные для сульфидов на гидротермальных полях САХ по [19]; 2 – сера в продуктах современного вулканизма, Камчатско-Курильская гряда; 3 – метеориты; 4 – магматиты изверженные; 5 – современные вулканилиты; 6 – газообразные сольфатары и горячие источники с глубинным очагом; 7 – самородная сера в современных вулканилитах; 8 – вулканический сернистый газ; 9 – вулканический сероводород; 10 – руды магматогенные; 11 – гидротермальные сульфидные минерализации; 12 – Саурей-Лекинтальбейский рудный узел, Полярный Урал; 13 – золото-сульфидные руды, Алданский щит; 14 – золото-кварцевые малосульфидные руды; 15 – пирротин-пиритовые минерализации в Бодайбинской впадине, Забайкалье; 16 – сульфидные джаспероиды, Алданский щит; 17 – целестин-баритовое гидротермально-осадочное оруденение; 18 – осадочные горные породы и руды; 19 – сульфат морской воды; 20 – эвапориты и соляные купола; 21 – сера биогенная; 22 – биогенный сероводород. Заимствования: 3, 5, 6 – по [8]; 4, 7–11, 18–22 – по [2]; 13–16 – по [13]; 17 – по [27]

изотопно-диспропорционирована с разбросом значений изотопного коэффициента от отрицательных до положительных значений.

Проведенные исследования показали, что в океанических сульфидных оруденениях сера по изотопному составу близка к метеоритному стандарту, практически не диспропорционируясь при переходе от ранних к поздним сульфидам [19]. Это можно расценивать как убедительное свидетельство именно глубинно-мантийного происхождения серы в таких оруденениях. Обращает на себя внимание, что сульфиды в океанических рудах, сульфиды и сульфаты в продуктах современного

камчатского вулканизма, изверженные глубинные магматиты и современные вулканисты Тихоокеанского кольца по признаку околосредней степени изотопного диспропорционирования серы образуют единую группу, явно обособленную от горных пород и руд с сильно изотопно-диспропорционированной серой.

Примесь углеродного вещества глубинно-эндогенного происхождения в океанических сульфидных рудах – факт уже известный [17, 18]. В ходе наших исследований такое вещество было выявлено в перидотит-пикробазальтовых магматитах в дисперсно-рассеянной форме, в вулканических шлаках, часто очень сильно углеродизированных ( $C_{\text{орг}}$  до 80 %) и в собственно сульфидных рудах (рис. 4). Установлено, что в продуктах пририфтового океанического вулканизма и рудообразования изотопный состав углерода колеблется в едином относительно узком диапазоне от –21 до –30 ‰ с модой в области –25...–28 ‰. При этом обнаруживается неконтрастный тренд изотопного облегчения углерода в последовательности от шлаков к сульфидным рудам и далее к магматитам. Весьма показательно, что углерод в исследованных образцах по изотопному составу контрастно отличается от углерода в современных морских микроорганизмах, сохранившихся на поверхности частиц вулканических пород и гидротермальных сульфидных руд.

В части проявлений углеродного вещества наряду с углеродом нам удалось зарегистрировать и азот. В частности, в углеродизированных шлаках его количество оказалось достаточным для определения изотопного состава, определившегося в статистических пределах  $\delta^{15}\text{N} = 1.39\text{--}3.63$  ‰. В продуктах камчатского вулканизма изотопный состав азота в углеродных веществах показал гораздо больший разброс – от 3.8 ‰ в вулканогенных органоидах до 8.67 ‰ в фумароле «Ядовитой». При этом полученные данные по азоту в продуктах континентального и океанического вулканизма уступают по интервалу колебаний биогенным объектам – бактериям, дрожжам и микроводорослям.

Таким образом, полученные данные указывают на безусловное сходство продуктов океанического и континентального вулканизма по изотопному составу углерода в углеродных веществах при том, что этот углерод в обоих случаях контрастно отличается по изотопии от углерода биогенного происхождения. Это свидетельствует о единой – абиогенной и, вероятно, мантийной природе углеродного вещества в продуктах глобального вулканизма и связанного с ним рудообразования. Не исключено, что именно таким образом и проявляется результат мантийной углеродизации земной коры, ответственной за основную массу углерода в последней.

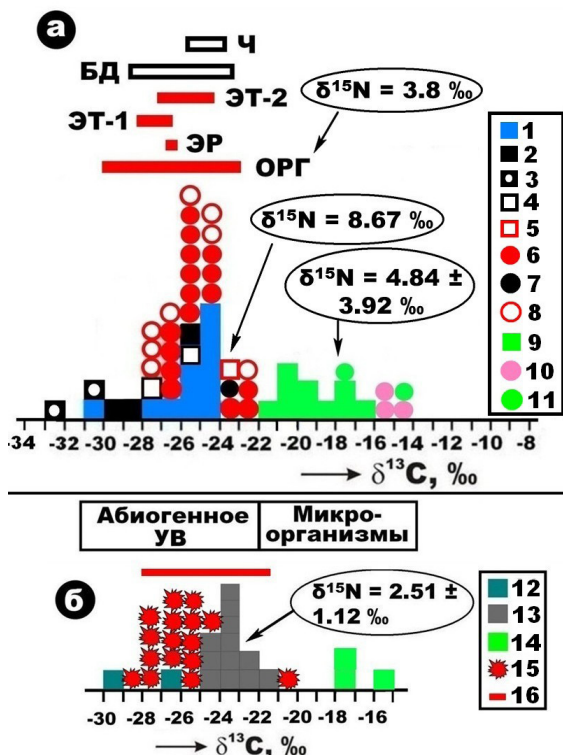


Рис. 4. Изотопный состав углерода абиогенного происхождения в продуктах современного вулканизма на Камчатке и в современных микроорганизмах (а) в сравнении с продуктами вулканизма и рудообразования в рифтовой зоне Срединно-Атлантического хребта (б). На а: 1–7 – углеродные фазы и минералы, соответственно дисперсно-рассеянное углеродное вещество в вулканитах (1), частицы шунгитоподобного вещества (2), парафиноподобная фаза (3), частицы самородного алюминия с включениями углеродного вещества (4), углеродное вещество м fumarоле «Ядовитой», алмазы (6), диуглеродные глобулы (7), карбиды (8); 9–11 – микроорганизмы, соответственно бактерии (9), дрожжи (9) и хлорелла (10). Рамками показаны диапазоны варьирования изотопного состава углерода в вулканогенных органоидах с Камчатки (ОРГ), в дисперсно-рассеянном углероде в вулканитах Эребуса (ЭР) и Этны (ЭТ-1), в органоидах из тefры Этны (ЭТ-2), в углеродном веществе, выявленном в железном метеорите Большой Долгучан (БД) и хондрите Челябинск (Ч). На б: 12 – дисперсно-рассеянное углеродное вещество в магматитах, 13 – углеродизированные шлаки, 14 – биогенное органическое вещество на поверхности шлаковых частиц, 15 – дисперсное углеродное вещество в сульфидных рудах с гидротермальных полей Ашадзе 1, Ашадзе 2, Zenит-Виктория, Коралловое, Краснов, Молодежное, Петербургское, Победа 1, Семенов; 16 – то же в сульфидных минерализациях САХ по [17]

### Библиографический список

1. Богданов Ю. А., Леин А. Ю., Лисицын А. П. Полиметаллические руды в рифах Срединно-Атлантического океана (15–40°C): минералогия, геохимия, генезис. М.: ГЕОС, 2015. 256 с.
2. Брендоу А. Х. Геохимия. М.: Недра, 1984. 463 с.
3. Бортников Н. С., Симонов В. А., Амплиева Е. Е., Ставрова О. О., Фуке И. Физико-химические условия гидротермальных рудообразующих систем «черных курильщиков», ассоциирующих с мантийными гипербазитами в Центральной Атлантике // Геология и геофизика, 2011. Т. 52. № 1. С. 1790–1801.
4. Габлина И. Ф., Добрецова И. Г., Бельтнев В. Е., Люткевич А. Д., Наркевский Е. В., Густайтис А. Н. Особенности современного сульфидное оруденения в районе 19°15'–20°08' с.ш. Срединно-Атлантического хребта // ДАН, 2012. Т. 442. № 4. С. 506–510.
5. Габлина И. Ф., Добрецова И. Г., Наркевский Е. В., Густайтис А. Н., Садчикова Т. А., Горькова Н. В., Сорвачев А. Т., Люткевич А. Д., Дара О. М. Влияние гидротермально-метасоматических процессов на формирование современных сульфидных руд в карбонатных донных осадках Срединно-Атлантического хребта (19–20° с. ш.) // Литология и полезные ископаемые, 2017. № 5. С. 387–408.
6. Габлина И. Ф., Добрецова И. Г., Попова Е. А. Метасоматическое сульфидное оруденение в современных осадках Срединно-Атлантического хребта // Геология морей и океанов. М.: ГЕОС, 2011. С. 153–157.
7. Габлина И. Ф., Попова Е. А., Садчикова Т. А., Хусил Т. А., Оськина Н. С., Бельтнев В. Е., Шилов В. В. Гидротермальные изменения современных органических осадков поля Ашадзе-1 (Срединно-Атлантический хребет, 13° с. ш.) // ДАН, 2010. Т. 433. № 4. С. 499–503.
8. Гриненко В. А., Гриненко Л. Н. Геохимия изотопов серы. М.: Наука, 1974. 273 с.
9. Добрецова И. Г. Минералы группы атакамита со дна Атлантического океана // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения-2020): Материалы российской конференции с междунар. участием. Сыктывкар: ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2020. С. 38–40.
10. Добрецова И. Г. О гидротермальном генезисе минералов группы атакамита в Атлантическом океане // Материала XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 2. М., 2019. С. 277–280.
11. Добрецова И. Г. О самородной меди в базальтах и околорудных изменениях базальтов на рудопроявлении «Семенов» САХ // Геология морей и океанов. Т. II. М.: ГЕОС, 2009. С. 268–270.
12. Добрецова И. Г., Лайба А. А. Гидротермальные изменения вмещающих пород глубоководных сульфидных руд Срединно-Атлантического хребта (на примере рудного узла «Семенов») // Отечественная геология, 2011. № 3. С. 108–115.
13. Загружина И. А., Голубчина М. Н., Миронюк Е. П. Изотопный состав серы сульфидов золоторудных месторождений // Использование изотопов серы для решения геологических задач. Л.: Недра, 1986. С. 96–112.
14. Змеевский М. В. Гидрохимические модели зоны разгрузки рудообразующих растворов на гидротермальном поле «Логачев», Срединно-Атлантический хребет // Кандидатская диссертация. Горный университет. СПб, 2017. 147 с.
15. Иванов В. Н., Бельтнев В. Е., Степанова Т. В., Лазарева Л. И., Самоваров М. Л. Сульфидные руды нового рудного узла 13°31' с.ш. САХ // Металлогения древних и современных океанов-2008. Рудные комплексы и рудные формации. Миасс: Имин УрО РАН, 2008. С. 19–22.
16. Кузнецов В. Ю. Сульфидные руды северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического хребта // Океанология, 2013. Т. 53. № 5. С. 680–693.
17. Леин А. Ю. Изотопы серы и углерода на активных гидротермальных полях Срединно-Атлантического хребта // Российский журнал наук о Земле, 2006. Т. 2. № 4.

18. *Лешн А. Ю., Москалев Л. И., Богданов Ю. А., Сагалевич А. М.* Гидротермальные системы и жизнь // *Природа*, 2000. № 5. С. 12–17.
19. *Лешн А. Ю., Ульянова Н. В., Ульянов А. А., Черкашев Г. А., Степанова Т. В.* Минералогия и геохимия сульфидных руд на подводных гидротермальных полях, связанных с серпентинитовыми протрузиями // *Российский журнал наук о Земле*, 2001. Т.
20. *Маракушев А. А., Панеях Н. А., Маракушев С. А.* Образование сульфидных руд и углеводородов в срединно-океанических хребтах // *Пространство и время*, 2011. Т. 4 (6). С. 150–156.
21. *Мелекесцева И. Ю., Котляров В. А., Иванов В. Н., Бельтнев В. Е., Добрецов И. Г., Нимис П.* Руды нового гидротермального сульфидного узла Семенов (13°31'), Срединно-Атлантический хребет // *Литосфера*, 2010, № 2. С. 41–67.
22. *Мелекесцева И. Ю., Котляров В. А., Хворов П. В., Иванов В. Н., Бельтнев В. Н., Добрецова И. Г.* благороднометаллическая минерализация гидротермального сульфидного узла Семенов, Срединно-Атлантический хребет // *Записки РМО*, 2010, № 2. С. 59–73.
23. *Силаев В. И.* Эволюция минералообразования в гидротермальных палеосистемах. Л.: Наука, 1989. 264 с.
24. *Сяли Ли, Лешн А. Ю., Ульянов А. А.* Микроэлементы и их распределение в сульфидах из черных курильщиков гидротермального поля Брокен-Спур // *Вестник МГУ. Сер. 4. Геология*, 2010. № 4. С. 44–48.
25. *Черкашев Г. А., Иванов В. Н., Бельтнев В. И., Лазарева Л. И., Рождественская В. И., Самоваров М. Л., Порошина И. М., Сергеев М. Б., Степанова Т. В., Добрецова И. Г., Кузнецов В. И.* Сульфидные руды северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического хребта // *Океанология*, 2013. Т. 53. № 5. С. 680–693.
26. *Шилов В. В., Бельтнев В. Е., Иванов В. Н., Черкашев Г. А., Рождественская И. И., Габлина И. Ф., Добрецова И. Г., Наркевский Е. В., Густайтис А. И., Кузнецов В. Ю.* Новые гидротермальные рудные поля на Срединно-Атлантическом хребте: Зенит-Виктория (20°08' с. ш.) и «Петербургское» (19°52' с. ш.) // *ДАН*, 2012. Т. 442. № 3. С. 383–389.
27. *Юшкин Н. П., Куңц А. Ф., Таранина Т. И.* Бариты Уральско-Пайхойской провинции. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 338 с.
28. *Feuguer Y., Cherkashov G., Charbon J. L., Ondreas H., Cannat M., Bortnikov N., Silantsev S. A., Etoubleau J.* Serpentine cruise – ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid-Atlantic Ridge^ First submersible studies on Ashadze 1 and 2, Logatchev 2 and Krasnov vent fields // *On line Supplement to Inter Ridge News*, 2008. V. 17. P. 16–39.

## HYDROTHERMAL SULFIDE MINES IN THE RUSSIAN EXPLORATION AREA OF THE MIDDLE ATLANTIC RIDGE

**V.I. Silaev, I.G. Dobretsova, A.I. Antoshkina, V.N. Filippov,  
B.A. Makeev, I.V. Smoleva, A.F. Khazov**

*silaev@geo.komisc.ru*

The results of new studies of sulfide mineralization from the rift valley of the Mid-Atlantic Ridge are considered. The regularities of the chemical and mineral composition, the peculiarities of mineralogical zoning at the local and regional scales are analyzed. The genetic aspects of the isotopic composition of sulfur and carbon in the products of oceanic and continental volcanism are discussed.

*Keywords: Mid-Atlantic Ridge, hydrothermal sulfide fields, chemical and mineral composition of mineralization, sulfur and carbon isotopies in products of oceanic and continental volcanism.*