

УДК 550.93:551.793 (571.54)

ХРОНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И СОСТАВ СУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ ИРИНОВСКОЕ (СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ)

© 2018 г. В. Ю. Кузнецов^{1,*}, Э. В. Табунс¹, Г. А. Черкашёв^{1,2},
В. Е. Бельтенёв³, Ф. Е. Максимов¹, К. А. Кукса¹, Л. И. Лазарева³,
С. Б. Левченко¹, И. Е. Жеребцов¹

Представлено академиком РАН А.П. Лисицыным 13.07.2015 г.

Поступило 14.07.2015 г.

Представлены результаты ²³⁰Th/U-датирования и минералого-геохимических исследований сульфидных руд гидротермального поля Ириновское и рудопрооявления Северо-западное (Срединно-Атлантический хребет). Сульфиды представлены в основном медно-колчеданными рудами с содержанием Cu 12–30%; менее развиты серно-, цинково-колчеданные руды. Анализ изменения состава сульфидов во времени позволил выделить три этапа их формирования. На каждом этапе предполагают смену минеральных ассоциаций от высокотемпературных (серно-, медно-колчеданных) к среднетемпературным (цинково-медным и цинково-колчеданным) сульфидным рудам. Общий диапазон формирования гидротермальных сульфидов поля Ириновское ~ 58–8 тыс. л. назад, а рудопрооявления Северо-Западное ~ 69–11 т.л.н.

DOI: 10.7868/S0869565218020159

Гидротермальное рудное поле Ириновское (центр поля: 13° 19,97' с.ш.; 44° 54,65' з.д.) расположено в пределах Российского разведочного района на Срединно-Атлантическом хребте. Первые российские работы на данном объекте проводили в 2011 г. в 34 рейсе нис “Профессор Логачев” [1, 2]; в 2013 г. поле Ириновское изучали во французско-немецкой экспедиции ODEMAR на нис “Пуркуа Па?” с помощью автономных и буксируемых подводных аппаратов [3]. В ходе этой экспедиции на поле Ириновское была зафиксирована высокотемпературная гидротермальная деятельность (чёрные курильщики с температурой флюида 363 °С). Особенность локализации рудного поля – его приуроченность к породам внутреннего океанического комплекса, представленным в разной степени гидротермально изменёнными габбро-перидотитами. Поле расположено на глубинах 2700–2850 м и включает в себя два рудных тела: 100 × 175 м, 100 × 125 м. В 1,8 км к северо-западу от поля Ириновское были также подняты сульфидные

руды. Район их обнаружения был обозначен как Северо-западное рудопрооявление. Гидротермальные образования на обоих объектах представлены массивными сульфидными рудами, прожилково-вкрапленной рудной минерализацией во вмещающих породах и гидротермальными корками оксигидроксидов Fe. Морфология и минеральный состав сульфидных руд в [4].

Хронологический аспект океанского гидротермального рудообразования остается одной из самых сложных и малоизученных проблем морской геологии. Действительно, данные о возрасте открытых к настоящему времени рудных объектов носят фрагментарный и часто противоречивый характер. Имеющиеся результаты геохронологических и связанных с ними минералого-геохимических исследований руд не позволяют делать однозначных выводов о времени активизации гидротермальной деятельности, приводящей к рудоотложению, её частоте и продолжительности, последовательности вариаций состава рудного вещества и решению вопроса об особенностях функционирования рудогенерирующих систем в пределах Срединно-Атлантического хребта [5]. В связи с этим наращивание данных комплексных вещественно-геохронологических исследований гидротермальных рудных объектов представляется весьма актуальным.

В нашей работе представлены результаты ²³⁰Th/U-датирования и минералого-геохимических исследований 15-ти образцов сульфидных руд, позволившие

¹ Институт наук о Земле
Санкт-Петербургского государственного университета

² Всероссийский научно-исследовательский институт
геологии и минеральных ресурсов
Мирового океана им. И.С. Грамберга, Санкт-Петербург

³ Полярная морская геологоразведочная экспедиция,
Санкт-Петербург

*E-mail: V.Kuznetsov@spbu.ru

оценить временные этапы рудообразования и вариации состава руд во времени.

Для выделения микроколичеств изотопов U, Th из рудных образцов использовали аналитическую методику, разработанную и успешно применяющуюся авторами при радиохимическом изучении природных объектов [6, 7]. Она основана на выщелачивании проб сульфидных руд (2–5 г) смесью кислот HNO₃ + HCl, концентрировании исследуемых радионуклидов на гидроксиде Fe, очистке от примесей и разделении U-, Th-фракций методом анионообменной хроматографии, электроосаждением и альфа-спектрометрическим определением ²³⁸U, ²³⁴U, ²³²Th, ²³⁰Th (альфа-спектрометр ALPHA DUO, ORTEC).

Элементный состав образцов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре Спектроскан Мах-GV. При этом использовали методику “тонких плёнок” с применением способа стандарт-рассеянного излучения в тонком слое образца [8, 9]. Такой подход позволил надёжно оценить содержания основных рудных и второстепенных примесных элементов в широком диапазоне их концентраций. Аналитическая ошибка определения концентрации элементов не превышала 5%, а предел обнаружения находился ниже кларковых значений.

Результаты радиохимического анализа и ²³⁰Th/U-возраст приведены в табл. 1 и на рис. 1, минералогическим геохимическим анализом – в табл. 2, 3.

Таблица 1. Результаты радиохимического анализа и ²³⁰Th/U-датировки образцов сульфидных руд поля Ириновское и рудопроявления Северо-западное

Образец	²³⁸ U расп/ мин·г	²³⁴ U расп/мин·г	²³⁰ Th расп/мин·г	²³² Th расп/мин·г	²³⁰ Th/ ²³⁴ U акт.	²³⁴ U/ ²³⁸ U акт.	Возраст, тыс. лет
Рудопроявление Северо-западное							
237-п-1	0,241 ± 0,053	0,341 ± 0,058	0,034 ± 0,006	≤0,020	0,101 ± 0,025	1,412 ± 0,380	11,5 ± ± 3,1/2,9
245-м-1	0,230 ± 0,012	0,256 ± 0,012	0,106 ± 0,007	0,017 ± 0,002	0,414 ± 0,033	1,109 ± 0,075	57,3 ± ± 6,6/6,0
250	1,239 ± 0,044	1,431 ± 0,048	0,683 ± 0,017	≤0,009	0,477 ± 0,020	1,155 ± 0,047	69,1 ± ± 4,4/4,2
250-м-1	0,350 ± 0,023	0,388 ± 0,025	0,163 ± 0,013	Н.о.	0,420 ± 0,044	1,109 ± 0,096	58,5 ± ± 9,0/8,0
Рудное поле Ириновское							
227-т-1	0,057 ± 0,009	0,071 ± 0,011	Н.о.	≤0,009	–	1,251 ± 0,276	–
227-м-1	2,429 ± 0,091	2,852 ± 0,102	0,411 ± 0,019	0,012 ± 0,003	0,144 ± 0,008	1,174 ± 0,047	16,8 ± 1,1
240-м-2	0,366 ± 0,018	0,398 ± 0,018	0,028 ± 0,004	≤0,007	0,070 ± 0,010	1,087 ± 0,068	7,8 ± 1,2/1,1
241	0,073 ± 0,010	0,112 ± 0,011	0,024 ± 0,005	≤0,021	0,212 ± 0,046	1,531 ± 0,262	25,6 ± ± 6,5/6,0
241-м-1	0,070 ± 0,008	0,089 ± 0,009	0,512 ± 0,024	0,019 ± 0,005	5,734 ± 0,623	1,275 ± 0,187	–
246	0,077 ± 0,005	0,106 ± 0,006	0,045 ± 0,005	Н.о.	0,424 ± 0,053	1,377 ± 0,123	58,2 ± ± 10,4/9,3
246-1	0,077 ± 0,013	0,092 ± 0,015	Н.о.	Н.о.	–	1,189 ± 0,280	–
246-2	0,062 ± 0,006	0,080 ± 0,007	0,026 ± 0,005	≤0,010	0,319 ± 0,070	1,293 ± 0,172	41,1 ± ± 12,0/10,5
246-3	0,439 ± 0,023	0,523 ± 0,025	0,121 ± 0,007	≤0,013	0,232 ± 0,017	1,193 ± 0,080	28,4 ± ± 2,5/2,4
246-м-1	0,037 ± 0,005	0,048 ± 0,006	0,018 ± 0,004	0,015 ± 0,003	0,373 ± 0,100	1,304 ± 0,246	49,6 ± ± 19,4/15,8
247-м-1	0,223 ± 0,023	0,284 ± 0,028	0,022 ± 0,005	≤0,012	0,077 ± 0,018	1,271 ± 0,178	8,6 ± 2,1

Примечание. Н.о. – ниже предела определения.

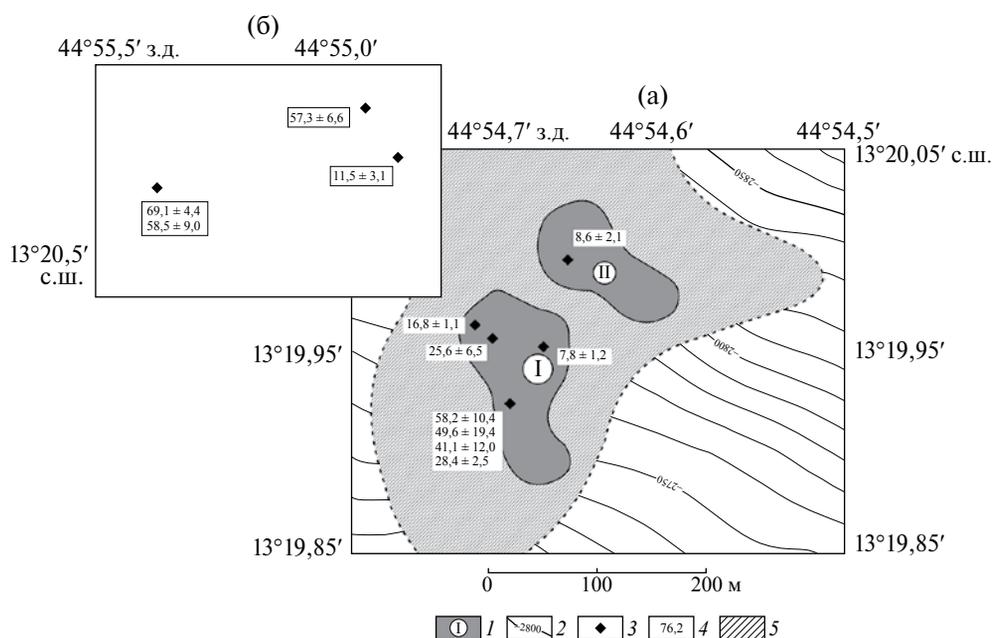


Рис 1. Схема строения и опробования нового рудного поля Ириновское (а) и схема опробования рудопроявления Северо-западное (б) с датировками. 1 – рудные тела и их номера; 2 – изобаты, м; 3 – точки опробования; 4 – $^{230}\text{Th}/\text{U}$ - возраст руд, тыс. лет; 5 – контуры гидротермального рудного поля Ириновское (по данным телепрофилирования).

Таблица 2. Характеристика рудных отложений поля Ириновское и рудопроявления Северо-западное

Образец	Тип руды	Минеральный состав
Рудопроявление Северо-западное		
237-п-1	Прожилково-вкрапленные	Py, Chp, [Hem], [Op]
245-м-1	Массивные серно-колчеданные	Mc, Py, Chp, [Ba], [Hem]
250	Серно-колчеданные	Mc, Py, Chp, [Ba], [Hem]
250-м-1	Массивные серно-колчеданные	
Рудное поле Ириновское		
227-т-1	Трубы медно-колчеданные	Chp, Cc, Cov, Bn, [Mc], [Py], [Sph]
227-м-1	Массивные медные	Chp, Cc, Cov, Bn, [Mc], [Op], [Py], [Sph]
240-м-2	Массивные медные	Chp, Cc, Op, Bn, [Mc], [Py], [Sph]
241	Трубы цинково-колчеданные	Sph, Mc, Py, Op, [Chp], [Cc], [Cov]
241-м-1	Массивные цинково-колчеданные	
246	Массивные медные	Chp, Cc, Op, Bn, [Mc], [Py], [Sph]
246-1		
246-2		
246-3		
246-м-1		
247-м-1	Массивные медные	Chp, Cc, Cov, Bn, [Py], [Mc], [Sph]

Примечание. Chp – халькопирит; Py – пирит; Bn – борнит; Cc – халькозин; Cov – ковеллин; Mc – марказит; Sph – сфалерит; Op – опал; Ba – барит; Hem – гематит; [] – второстепенные минералы.

Таблица 3. Химический состав рудных отложений поля Ириновское и рудопроявления Северо-западное

Образец	S	Fe	Cu	Zn	Si	Al	Ca	K	P	Ti	Ni	Co	Mn
	мас. %								г/т				
Рудопроявление Северо-западное													
245-м-1	49,78	39,74	1,90	0,053	0,37	0,09	0,03	0,03	3	6	194	168	165
237-п-1	29,33	29,62	20,8	0,059	5,13	0,27	0,05	1,16	198	51	813	235	517
250	44,23	35,26	6,70	0,061	0,85	0,19	0,27	0,10	62	22	282	194	154
250-м-1	39,48	36,07	16,8	0,068	0,34	0,11	0,02	0,03	83	7	288	340	123
Рудное поле Ириновское													
241	27,16	24,51	29,6	8,674	6,69	0,20	0,02	1,65	67	9	407	213	117
246	24,54	23,49	27,7	0,147	8,95	0,16	0,04	2,45	83	8	404	129	355
246-1	28,68	18,07	26,0	0,103	5,74	0,17	0,01	1,35	40	6	471	101	192
246-2	28,71	29,27	12,1	0,133	5,35	0,12	0,02	1,23	61	3	309	182	67
246-3	31,59	25,58	27,9	0,101	5,02	0,20	0,03	1,13	141	7	502	133	227
247-м-1	29,84	27,33	21,2	0,189	6,04	0,18	0,01	1,44	86	48	470	150	99
227-т-1	31,33	29,44	14,3	0,077	4,61	0,16	0,01	1,00	79	7	369	140	65
227-м-1	32,70	32,41	29,3	0,073	3,87	0,16	0,01	0,80	112	38	426	137	200
240-м-2	23,20	11,91	44,0	0,125	9,61	0,17	0,01	2,71	133	12	719	85	83
241-м-1	23,39	20,44	27,8	1,229	10,23	0,17	0,02	2,91	62	34	390	173	74
246 -м-1	26,25	25,85	27,3	0,086	8,75	0,18	0,02	2,36	83	22	400	130	106

Как видно из данных табл. 1, общий диапазон формирования гидротермальных отложений поля Ириновское укладывается во временной интервал $\sim 58-8$, а рудопроявления Северо-западное $\sim 69-11$ т.л.н.

Результаты минералого-геохимического анализа (табл. 2, 3) свидетельствуют, что сульфиды представлены в основном медно-колчеданными рудами с содержанием Cu 12–30%, которое в единичных случаях снижается до уровня первых процентов. Менее развиты серно- и цинково-колчеданные руды. Концентрация Zn при этом меняется в узких пределах и лишь в двух пробах превышает первые %. Среди нерудных элементов наиболее высокие содержания у кремния, достигающего в пересчёте на SiO₂ 22%. (обр. 241-м-1; табл. 3), что свидетельствует о значительной роли процессов окварцевания (опализации) руд. Лишь для самых древних серно-колчеданных руд из рудопоявления Северо-западное (обр. 245-м-1; 250; 250-м-1) окварцевание не характерно. В ряде образцов рудопоявления Северо-западное отмечен барит.

В целом наблюдаемые вариации основных рудных элементов могут быть объяснены изменением в соотношениях нормативных пирита,

халькопирита, сфалерита. Данное положение подтверждает рис. 2, где чётко видны линейные тренды вариаций состава образцов, отвечающие смеси пирит-халькопирит, пирит-сфалерит или их комбинации. Отклонение от этой зависимости может быть объяснено присутствием некоторых количеств вторичных минералов: борнита, гематита и/или ковеллина.

Анализ изменения состава сульфидов во времени, основанный на совместном использовании датировок и минералого-геохимических данных, с определённой долей условности позволил выделить три этапа формирования руд (рис. 3).

Первый этап начался с формирования серно-колчеданных руд $\sim 69-57$ т.л.н. и завершился образованием медно-колчеданных руд ~ 50 т.л.н.

Начало второго этапа соответствует возрастной отметке порядка 41 т.л.н, когда начали отлагаться медно-колчеданные руды. Завершение этапа характеризуется формированием цинково-колчеданных руд ~ 26 т.л.н.

Третий, завершающий, этап отмечен формированием медно-колчеданных руд $\sim 17-8$ т.л.н.

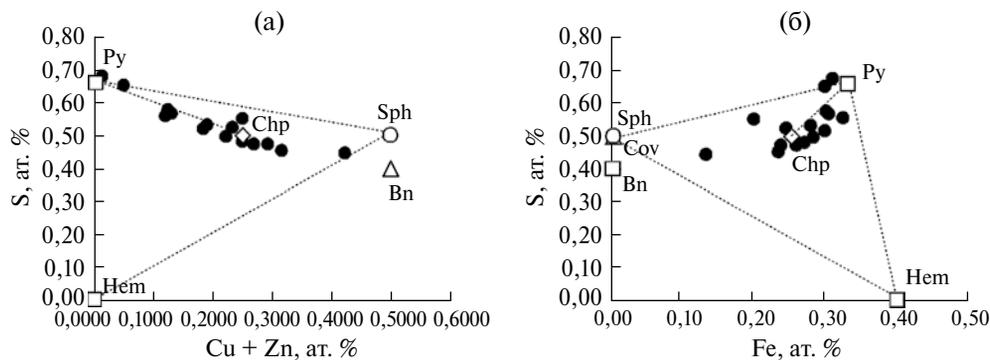


Рис. 2. Вариации составов руд поля Ириновское и рудопроявления Северо-западное в зависимости от изменения соотношения основных рудных минералов в координатах: (а) S–Cu+Zn, ат.%; (б) S–Fe, ат.%. Условные обозначения см. табл. 2.

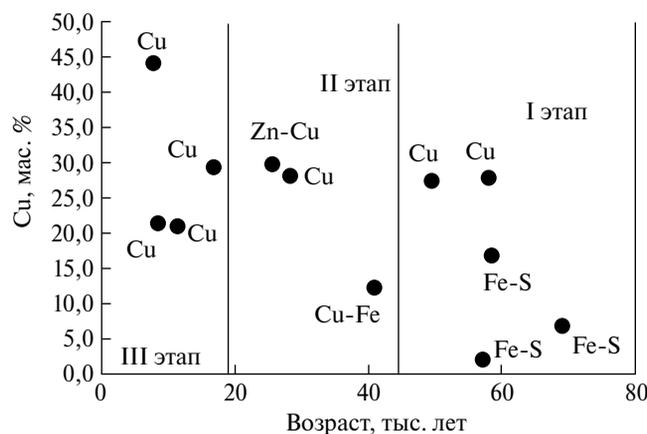


Рис. 3. Этапы формирования рудных тел в координатах возраст – содержание Cu для рудного поля Ириновское и рудопроявления Северо-западное.

В [10], помимо выделенных этапов, были определены и стадии формирования руд, отражающие эволюцию на каждом этапе образования минеральных ассоциаций сульфидных руд от высокотемпературных (серно-, и медно-колчеданных) к среднетемпературным (цинково-медным, цинково-колчеданным). Аналогичная тенденция отмечается и для рудных образований новых гидротермальных полей, хотя полный цикл смены стадий прослеживается не для всех трёх выделенных этапов. Возможно, это связано с недостаточной степенью опробования рудных объектов.

Таким образом, в результате проведённых комплексных минералого-геохимических и геохронологических исследований сульфидных руд новых гидротермального поля Ириновское и рудопроявления Северо-западное была выявлена цикличность рудообразования, отмеченная нами ранее для гидротермального поля Зенит-Виктория и характерная, по-видимому, для всех океанских рудных гидротермальных систем.

Работу выполняли в рамках проектов СПбГУ № 3.37.135.2014, 18.37.141.2014 и при частичной поддержке гранта РФФИ № 14–05–31401.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельтенёв В.Е., Иванов В.Н., Сергеев М.Б., Рождественская И.И., Самоваров М.Л. Результаты поисковых работ на полиметаллические сульфиды в Атлантике в 2011 г. в свете подачи российской заявки в МОМД // Разведка и охрана недр. 2012. № 8. С. 50–55.
2. Черкашёв Г.А., Иванов В.Н., Бельтенёв В.И., Лазарева Л.И., Рождественская И.И., Самоваров М.Л., Порошина И.М., Сергеев М.Б., Степанова Т.В., Добрецова И.Г., Кузнецов В.Ю. Сульфидные руды северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического хребта // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 1–14.
3. Jamieson J.W., Petersen S., Augustin N., Steinfhrer A., Escartin J. ODEMAR Scientific Party – Seafloor Massive Sulfide Formation on Oceanic Core Complexes:

- Recent Exploration of the Semyenov and Irinovskoe Hydrothermal Fields, Mid-Atlantic Ridge. In: Minerals of the Ocean-7. Abstr. vol. St. Petersburg, 2014. P. 42–45.
4. *Melekestseva I. Yu., Beltenev V.E., Ivanov V.N.* Peterburgskoe and Irinovskoe Hydrothermal fields, MAR: a Diversity of Massive Sulfides and Mineralized Rocks. In: Minerals of the Ocean-7. Abstr. vol. St. Petersburg, 2014. P. 65–68.
 5. *Богданов Ю.А., Леин А.Ю., Лисицын А.П.* Полиметаллические руды в рифтах Срединно-Атлантического хребта (15–40' с.ш.): минералогия, геохимия, генезис. М.: Геос, 2015. 256 с.
 6. *Кузнецов В.Ю.* Радиохронология четвертичных отложений. СПб., 2008. 312 с.
 7. *Кузнецов В.Ю., Максимов Ф.Е.* Методы четвертичной геохронометрии в палеогеографии и четвертичной геологии. СПб.: Наука, 2012. 191 с.
 8. *Renault J., McKee C.* Method of X-ray Fluorescence Analysis For Environmental Lead, Especially in Household Dust, Using Thin-film Principles // Analyst. 1995. V. 120. P. 1261–1264.
 9. *Игнатова Ю.А., Еритенко А.Н., Ревенко А.Г., Цветянский А.Л.* Рентгенофлуоресцентный анализ твёрдотельных плёнок и покрытий // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 2. 126–140.
 10. *Кузнецов В.Ю., Табунс Э.В., Бельтенёв В.Е., Черкашев Г.А., Максимов Ф.Е., Кукса К.А., Баранова Н.Г., Левченко С.Б., Лян Хун Лэй.* ²³⁰Th/U-хронология формирования глубоководных полиметаллических сульфидов в пределах рудного поля Зенит-Виктория (20°08' с.ш.) Срединно-Атлантического хребта // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2013. Т. 4. С. 119–130.