

УДК 550.424

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ВЕРХНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОСАДКОВ В ЦЕНТРЕ АКТИВНОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (СРЕДИННАЯ ДОЛИНА, ХРЕБЕТ ХУАН ДЕ ФУКА, ТИХИЙ ОКЕАН)

©2024 г. В. Б. Курносов*, Ю. И. Коновалов, К. Р. Галин**

Геологический институт РАН, Москва, Россия

**e-mail: vic-kurnosov@rambler.ru*

***e-mail: kongsalin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 07.07.2023 г.

После доработки 29.07.2023 г.

Принята к печати 28.12.2023 г.

В статье представлены результаты изучения изменения химического состава верхнеплейстоценовых осадков из скважины ODP 1036A, пробуренной в Срединной Долине океанического хребта Хуан де Фука на гидротермальном поле “Мертвая собака” до глубины 38.50 м, в 9 м от “черного курильщика” с температурой 268°C. Наиболее существенные изменения химического состава осадков произошли в нижних интервалах скважины. В интервале 20–30.70 м увеличилась концентрация большого количества химических элементов и, соответственно, произошло обеднение гидротермального флюида этими элементами. В интервале 30.70–38.5 м, напротив, концентрация большинства химических элементов уменьшилась, что привело к существенному обогащению этими элементами гидротермального флюида.

Ключевые слова: гидротермальная система, океанический хребет Хуан де Фука, гидротермальное изменение осадков, взаимодействие вода–порода, глубоководное бурение

DOI: 10.31857/S0030157424040109, EDN: PRIFLE

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с открытия в 70-х годах прошлого века “черных курильщиков”, основное внимание исследователей сосредоточено на изучении гидротерм, сульфидных отложений и металлоносных осадков, которые расположены на поверхности дна в осевых долинах срединно-океанических хребтов. Состав этих рудообразующих гидротерм формируется под дном в гидротермальных системах, находящихся над магматическими камерами. Изученность изменения пород океанической коры внутри гидротермальных систем в процессе взаимодействия вода–порода, происходящего в недрах океанической коры, сильно уступает изученности гидротермальных источников, гидротермальных и гидротермально-осадочных рудных отложений на поверхности дна. Это относится и к гидротермальным системам в хребтах с осадочным покровом мощностью в сотни метров (в зарубежных публикациях эти океанические хребты называются “sedimented ridges”). В них конвективные гидротермальные системы охватывают не только кристаллический фундамент, но и осадочный покров, в котором при

взаимодействии вода–порода происходит изменение вещественного состава осадков и трансформация химического состава рудообразующих растворов, которые разгружаются на дне в виде гидротермальных источников.

Возможность изучения преобразования пород в хребтах, перекрытых осадками, появилась в связи с бурением глубоководных скважин по Международной программе океанского бурения (ODP – Ocean Drilling Program) на гидротермальном поле “Мертвая собака” с действующими высокотемпературными гидротермальными источниками. Наиболее близко к гидротермальному источнику пробурена скважина 1036A. Изменение химического состава осадков из этой скважины не было изучено ранее [15].

Основная задача статьи – изучить изменение химического состава осадков из скважины 1036A, пробуренной до глубины 38.50 м в верхнеплейстоценовых осадках, прилегающих к центральному каналу подъема и разгрузки гидротермального раствора.

Для решения основной задачи были использованы образцы осадков из скважины, отобранные

в кернохранилище Программы океанского бурения (Ocean Drilling Program – ODP), которое находится при Техасском университете (Texas A&M University) в г. Колледж Стейшн (College Station).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Срединная Долина хребта Хуан де Фука является тектономагматической структурой среднескоростного спрединга (58 мм/год) [6]. В Срединной Долине находится гидротермальное поле “Мертвая собака” размером 800 x 400 м с высоким тепловым потоком (до 835 мВт/м²), на котором расположены 15 гидротермальных источников [6, 7] (рис. 1). В районе гидротермального поля накопилось 250–300 м плейстоценовых гемипелагических осадков с редкими прослоями дистальных турбидитов [6].

На гидротермальном поле была пробурена серия скважин на разном удалении от гидротермальных источников [6, 8].

Скважина 1036А расположена наиболее близко к гидротермальному источнику с температурой 268°С, в 9 м от него (рис. 1). Она пробурена до глубины 38.50 м через толщу воды в 2407 м (рис. 2). В скважине на глубине 20–30 м температура составляет 200°С и выше [8].

Осадки из скважин, пробуренных в северном сегменте Срединной Долины хребта Хуан де Фука на гидротермальном поле “Мертвая собака” и за его пределами, участники проведенного ранее в этом районе рейса ODP 139 разделили на Толщи I, IIА, IIВ, IIС, IIД, III, IV [6]. Участники рейса ODP 169 приняли это деление осадков и внесли в него некоторые изменения. В результате разрез осадков из скважины 1036А был ими разделен на

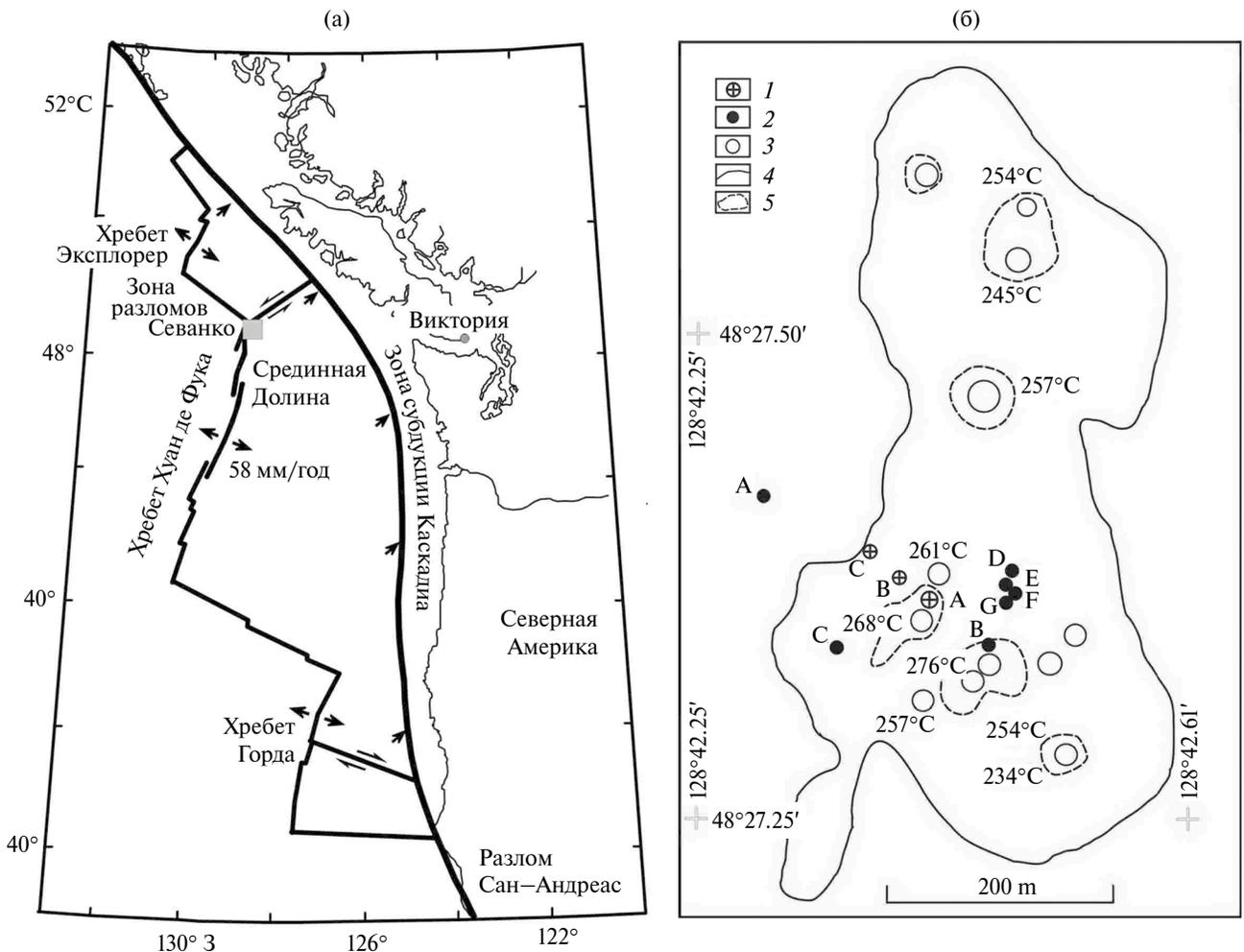


Рис. 1. Структурно-тектоническая схема Срединной Долины хребта Хуан де Фука в северо-восточной части Тихого океана [6], серым квадратом показан район исследований, помещенный на рис. 1б, стрелки показывают направление движения плит (а); и расположение скважин и гидротермальных источников в районе гидротермального поля “Dead Dog” [6, 8] (б): 1 – скважины ODP 1036А, В, С (ODP Рейс 169), скважина 1036А выделена большой буквой А; 2 – скважины ODP 858А, В, С, D, F, G (Рейс ODP 139); 3 – гидротермальные источники; 4 – контур гидротермального поля; 5 – граница гидротермальных отложений.

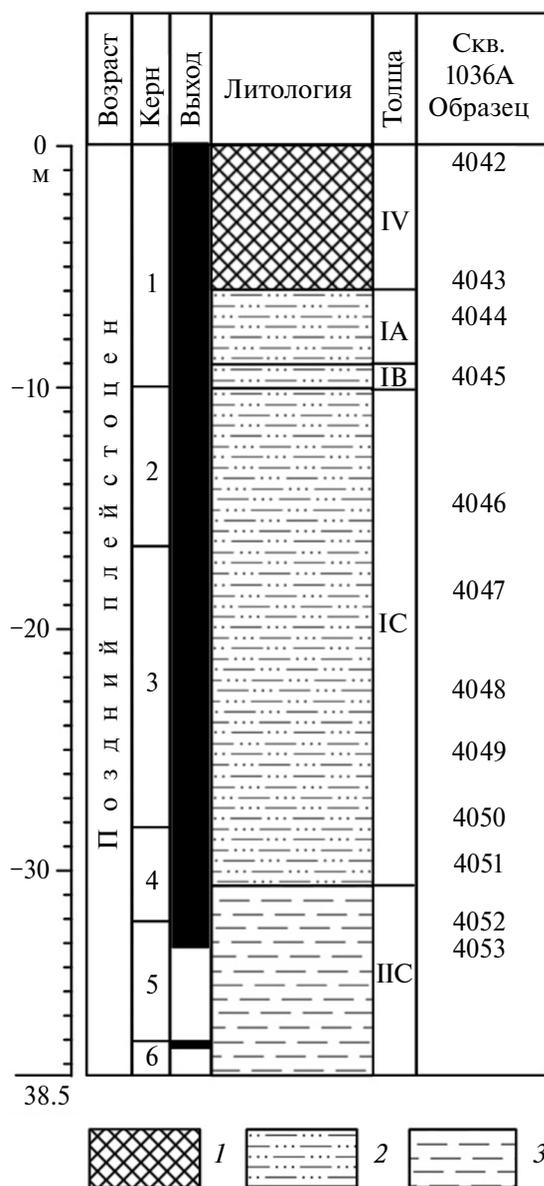


Рис. 2. Литологическая колонка скважины ODP 1036А с расположением образцов: 1 – сульфидный делювий (обломки обрушения сульфидной трубы действующего “черного курильщика”), 2 – алеврито-глинистые гемипелагические осадки, 3 – гемипелагические глины.

Толщи: IA, IB, IC, IIC, IV [8]. Толща I, которая состоит из неизменных фоновых терригенных осадков, изучена в скважинах ODP 855A, C, D [6], пробуренных в подножии восточного крутого склона Срединной Долины.

Краткое описание осадков этих Толщ, сделанное участниками рейса ODP 169 на борту бурового судна “JOIDES Resolution” при визуальном описании керна и изучении в оптическом микроскопе [8]:

Толща IV (0–6.10 м) сложена обломками обрушения сульфидной трубы “черного курильщи-

ка”. Отложения Толщи IV подстилаются осадками Толщи IA.

Толща IA (6.10–9.20 м) состоит из неизменных или слабо измененных гемипелагических алевритовых глин с несколькими тонкими прослоями алевритов. Алевритовые осадки состоят в основном из глинистых минералов с небольшой примесью кальцита, а также содержат примесь кварца, полевых шпатов, роговой обманки, пироксена, эпидота и пирита. В этих осадках встречаются обломки обрушения сульфидной трубы “черного курильщика”.

Толща IB (9.20–10.04 м) – алевритовая гемипелагическая глина с карбонатными конкрециями и карбонатным цементом, присутствует карбонат в цементе.

Толща IC (10.04–30.70 м) – измененная гемипелагическая алевритовая глина с аутигенным ангидритом и карбонатными конкрециями.

Толща IIC (30.70–38.50 м) представлена гемипелагическими осадками с тонкими прослоями мелко-тонкозернистых турбидитов (измененные аргиллиты, алевролиты и пески, присутствуют ангидритовый цемент и ангидритовые конкреции, а также карбонатные конкреции).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для всех видов химического анализа образцы осадков растерты до пудры в лабораторном дисковом истирателе (ЛДИ-65 карбид кремния).

Содержание в осадках макроэлементов определено методом рентгено-флюоресцентного анализа (РФА) в лаборатории химико-аналитических исследований в Геологическом институте РАН. Содержание CO_2 определялось титрометрическим методом после выделения соляной кислотой и поглощения раствором щелочи. Содержание гигроскопичной воды определялось путем высушивания образца в течение 4 ч в муфеле при температуре 105°C .

Содержание в осадках микроэлементов, включая редкоземельные элементы, определено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на спектрометре iCAP-6500 Duo (Thermo Scientific, США) в лаборатории ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа в Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, г. Черноголовка, Московская область. Информация о методе ИСП-МС, который используется в этой лаборатории, изложена в статье [1].

Изменение химического состава осадков определялось сравнением содержания химических

элементов в них с содержанием химических элементов в неизменных фоновых терригенных осадках (реперах) из скважин ODP 855A, C, D. Химический состав этих осадков приведен в статье [2]. Пары для такого сравнительного изучения выбраны на основании их близости в петрографическом и гранулометрическом отношении, чтобы не допустить сравнения разнотипных осадков, например, глин с песчанистыми алевритами. Не для всех образцов гидротермально измененных осадков из скважины 1036A есть соответствующие им по петрографическим и гранулометрическим данным образцы неизмененных фоновых осадков из скважин ODP 855A, C, D. Для них спайдерграммы не делались.

Петрографические прозрачные шлифы осадков изучены в оптическом микроскопе ВЮptic ВР-100.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам гранулометрического анализа осадков из скважины 1036A и фоновых терригенных неизмененных осадков из скважин

855A, C, D, а также просмотра шлифов осадков в оптическом микроскопе, все изученные образцы, по химическому составу которых сделаны спайдерграммы, относятся к алевритовым глинам и глинистым алевритам.

В статье приняты условные границы интенсивности изменения (увеличение/уменьшение) содержания химических элементов в измененных осадках по сравнению с их содержанием в неизмененных фоновых терригенных осадках: слабая (меньше, чем в 2 раза), средняя (в интервале 2–4 раза), сильная (больше, чем в 4 раза).

Изменение химического состава осадков из скважины 1036A. Химический состав осадков из скважины 1036A показан в таблицах 1–3.

Толща IA (обр. 4044)

Макроэлементы. Содержание макроэлементов в осадках Толщи IA не изучалось.

Микроэлементы. В осадках Толщи IA сильно возросла концентрация Ag (рис. 3). На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков произошло увеличение содержания Cu, Cd, Ba, Pb, U (рис. 3).

Таблица 1. Химический состав (вес. %) осадков из скважины ODP 1036A, северный сегмент Срединной Долины, хребет Хуан де Фука

Образец	4045	4046	4047	4048	4049	4050	4051	4052	4053
Керн-секция, интервал (см)	2Н-1, 0–10	2Н-4, 85–95	2Н-7, 0–10	3Н-3, 60–70	3Н-5, 0–10	3Н-7, 10–20	4Н-1, 130–140	4Н-4, 40–47	5Х-СС, 7–13
Толща	IV	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC
Глубина, м	9.50	14.85	18.50	22.60	25.00	28.10	29.80	31.90	33.07
SiO ₂	47.46	55.03	68.34	34.06	35.24	35.36	28.89	58.93	67.47
TiO ₂	0.77	0.78	0.50	0.80	0.70	0.62	0.39	0.56	0.43
Al ₂ O ₃	13.65	14.74	9.63	15.26	14.15	12.30	10.09	14.00	8.63
Fe ₂ O ₃	2.91	3.88	2.12	3.35	1.67	1.78	1.09	0.72	0.65
FeO	3.04	1.70	1.35	3.11	5.41	2.52	1.35	1.30	1.36
MnO	0.15	0.07	0.12	0.27	0.32	0.15	0.10	0.05	0.05
MgO	7.39	8.22	6.11	23.72	26.23	29.62	16.40	11.98	14.76
CaO	5.56	0.38	0.26	1.42	0.85	4.63	21.622	2.15	0.35
Na ₂ O	3.89	1.92	1.29	2.28	1.27	1.16	1.09	0.75	0.18
K ₂ O	1.83	2.58	0.87	0.64	0.39	0.05	0.39	1.36	0.06
P ₂ O ₅	0.29	0.30	0.19	0.29	0.36	0.49	0.41	0.26	0.22
п. п. п.	12.94	10.41	8.86	14.69	12.52	11.42	7.99	7.45	5.32
Сумма	99.88	99.67	99.63	99.62	99.11	99.56	89.81	99.50	99.46
H ₂ O ⁻	2.04	2.18	1.48	2.44	2.96	3.68	3.6	1.06	0.63
S	0.73	0.93	0.77	1.31	0.49	1.96	11.07	1.11	0.30
CO ₂	6.44	0.44	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.94	0.35	0.34

Таблица 2. Содержание микроэлементов (мкг/г) в осадках из скважины ODP 1036A

Образец	4042	4043	4044	4045	4046	4047	4048	4049	4050	4051	4052	4053
Керн-секция, интервал (см)	1Н-1, 0–10	1Н-4, 128–138	1Н-5, 80–90	2Н-1, 0–10	2Н-4, 85–95	2Н-7, 0–10	3Н-3, 60–70	3Н-5, 0–10	3Н-7, 10–20	4Н-1, 130–140	4Н-4, 40–47	5X–CC, 7–13
Толща	IV	IV	IA	IB	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IIС	IIС
Глубина, м	0.00	5.78	6.80	9.50	14.85	18.50	22.60	25.00	28.10	29.80	31.90	33.07
Li	42.4	50.7	47.7	32.3	37.7	19.4	34.0	26.4	33.1	11.8	10.7	12.6
Be	0.60	0.69	1.5	1.2	1.6	1.3	1.3	0.87	1.2	0.39	0.99	0.86
Sc	1.1	0.23	16.5	15.3	16.3	11.4	17.5	15.0	12.9	6.6	3.9	4.3
V	21.8	19.1	140	123	143	96.6	155	134	120	55.7	97.4	76.2
Cr	8.6	2.8	77.0	59.5	83.4	44.1	69.9	73.6	69.5	34.9	58.6	36.9
Co	3.5	9.0	20.7	22.2	17.4	17.1	20.8	19.4	17.5	7.8	17.3	7.9
Ni	4.0	6.5	80.6	54.6	64.2	40.2	49.2	42.4	41.6	21.3	36.1	31.3
Cu	4327	6764	209	50.0	49.8	46.3	281	107	11.7	66.2	6.9	15.0
Zn	1037	2547	198	94.0	135.0	71.3	507	2855	179	273	21.6	24.6
Ga	6.1	8.2	16.2	14.7	16.9	9.5	18.4	20.7	16.1	7.5	13.6	8.0
As	4.1	4.0	3.5	10.6	8.3	29.0	21.1	5.0	3.8	5.8	5.9	14.3
Rb	2.5	1.8	71.0	62.4	103.1	32.0	23.3	12.5	0.6	7.2	40.9	2.2
Sr	117	63.7	359	207	81.9	61.0	95.6	105	242	11.7	118	27.9
Y	1.1	0.8	22.1	19.3	19.6	12.9	15.8	12.8	51.4	9.5	16.3	9.2
Zr	3.9	1.8	105	100	109	67.5	111.8	94.2	99.4	50.8	81.2	67.2
Nb	0.20	0.10	9.2	7.8	9.6	5.5	9.3	9.6	7.3	4.0	7.9	5.1
Mo	0.33	2.5	2.6	6.1	8.5	8.9	9.8	13.9	53.3	11.3	1.2	2.4
Ag	3.7	6.0	1.63	0.19	0.46	0.59	0.23	0.07	0.23	0.17	0.06	1.0
Cd	0.90	4.8	0.79	0.18	0.56	0.25	1.2	6.9	0.08	0.32	< ПО	< ПО
Sb	0.63	5.4	1.28	1.2	1.3	2.0	1.4	0.32	0.42	0.61	0.07	0.55
Cs	0.18	0.09	4.3	3.4	11.3	1.9	2.0	0.37	0.024	0.48	1.0	0.12
Ba	713	433	1614	4350	985	254	156	76.2	2.8	136	267	27.0
Hf	0.10	0.05	2.7	2.5	2.7	1.7	2.9	2.4	2.5	1.3	2.0	1.6
Ta	< ПО	< ПО	0.6	0.50	0.63	0.35	0.64	0.61	0.48	0.26	0.48	0.31
W	0.22	0.14	1.0	1.0	1.3	0.38	0.77	0.74	0.57	0.63	0.48	0.35
Tl	0.54	2.1	0.61	1.4	1.3	0.26	13.4	1.9	0.18	0.77	0.21	0.06
Pb	195	762	27.7	11.4	13.9	17.5	13.4	7.3	3.8	27.4	2.9	3.6
Bi	2.3	4.4	0.27	0.14	0.20	0.09	0.19	0.17	0.41	0.07	0.08	0.13
Th	0.08	0.04	5.5	4.5	6.4	3.5	6.0	7.0	4.5	2.5	4.9	2.5
U	1.3	1.5	5.5	2.4	10.2	2.9	7.2	3.7	10.8	3.3	1.8	1.9

Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов (мкг/г) в осадках из скважины ODP 1036A

Образец	4042	4043	4044	4045	4046	4047	4048	4049	4050	4051	4052	4053
Керн-секция, интервал (см)	1Н-1, 0–10	1Н-4, 128–138	1Н-5, 80–90	2Н-1, 0–10	2Н-4, 85–95	2Н-7, 0–10	3Н-3, 60–70	3Н-5, 0–10	3Н-7, 10–20	4Н-1, 130–140	4Н-4, 40–47	5X–CC, 7–13
Толща	IV	IV	IA	IB	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IIС	IIС
Глубина, м	0.00	5.78	6.80	9.50	14.85	18.50	22.60	25.00	28.10	29.80	31.90	33.07
La	0.64	1.07	19.04	15.93	20.14	10.30	13.67	19.56	13.94	10.50	17.63	8.29
Ce	1.12	1.80	37.43	32.46	40.47	22.11	25.57	49.43	43.29	21.49	40.47	17.20
Pr	0.14	0.19	4.51	3.90	4.74	2.65	2.71	6.10	7.45	2.74	4.84	2.04
Nd	0.59	0.71	18.94	16.39	19.39	10.97	10.33	23.42	39.85	11.77	19.19	8.07
Sm	0.17	0.14	4.16	3.81	4.17	2.51	2.29	4.06	15.39	2.60	4.04	1.71
Eu	0.08	0.31	1.00	0.85	0.81	0.35	0.32	0.45	0.71	0.37	0.25	0.08
Gd	0.18	0.15	4.07	3.62	3.89	2.46	2.35	3.12	12.99	2.17	3.45	1.62
Tb	0.03	0.02	0.63	0.56	0.59	0.38	0.42	0.42	1.79	0.32	0.51	0.27
Dy	0.17	0.11	3.90	3.36	3.41	2.35	2.82	2.49	9.58	1.77	2.94	1.66
Ho	0.04	0.02	0.84	0.69	0.73	0.50	0.63	0.51	1.64	0.35	0.60	0.37
Er	0.10	0.06	2.16	1.85	1.89	1.32	1.76	1.35	3.46	0.89	1.54	0.97
Tm	0.01	0.01	0.32	0.28	0.28	0.20	0.28	0.20	0.44	0.13	0.22	0.14
Yb	0.11	0.06	2.04	1.85	1.80	1.30	1.85	1.35	2.56	0.83	1.40	0.92
Lu	0.01	0.01	0.32	0.27	0.27	0.18	0.28	0.21	0.31	0.12	0.21	0.15

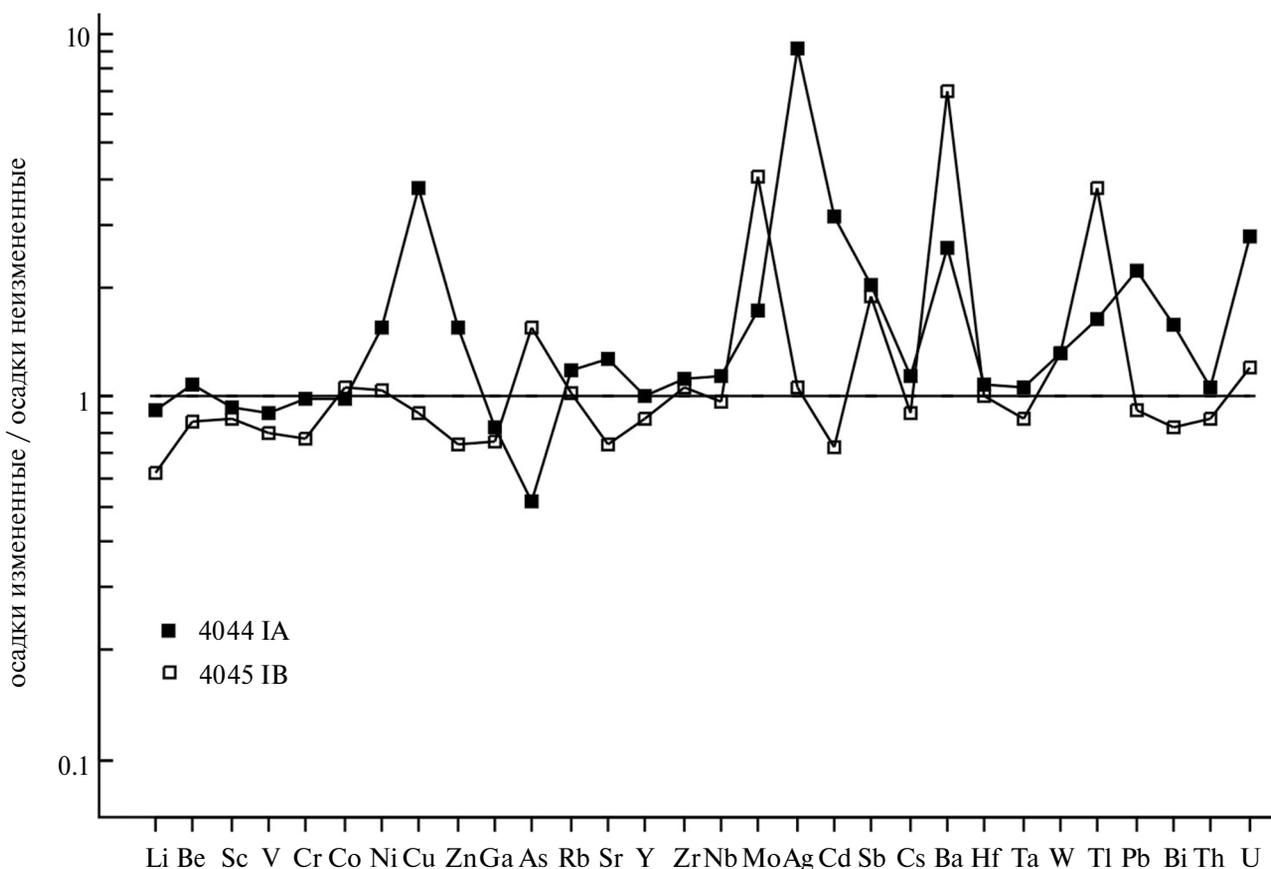


Рис. 3. Содержание микроэлементов в осадках из скважины ODP 1036A (Толщи IA и IB). Здесь и далее на рисунках – нормировано по среднему составу неизменных осадков из скважин ODP 855A, C, D.

Концентрация большинства микроэлементов в осадках Толщи IA слабо изменилась, в основном в виде увеличения их содержания. Кроме того, остались неподвижными Be, Sc, Cr, Co, Y, Zr, Hf, Ta, Th (рис. 3).

Редкоземельные элементы. Содержание РЗЭ в этих осадках не изменилось по сравнению с их концентрацией в неизменных фоновых осадках (рис. 4).

Толща IB (обр. 4045)

Макроэлементы. В осадках Толщи IB концентрация макроэлементов близка их содержанию в неизменных фоновых осадках, за исключением S, ее содержание в обр. 4045 сильно увеличилось (рис. 5).

Микроэлементы. В осадках Толщи IB сильно возросла концентрация Ba (рис. 3).

На среднем уровне интенсивности изменения химического состава осадков увеличилось содержание Mo и Tl (рис. 3). Слабо увеличилось в этих осадках содержание As, Sb и U, а содержание Li, Be, Sc, V, Cr, Cu, Zn, Ga, Sr, Y, Cd, Ta, Bi, Th слабо уменьшилось. Неподвижными остались Co, Ni, Rb, Zr, Nb, Ag, Cs, Hf, Pb.

Редкоземельные элементы. Содержание РЗЭ в этих осадках не изменилось по сравнению с их

концентрацией в неизменных фоновых осадках (рис. 4).

Таким образом, заметные изменения химического состава осадков Толщи IB проявились только для небольшого количества химических элементов (S, Ba, Mo, Tl).

Толща IC

(верхняя половина, образцы 4046 и 4047)

Макроэлементы. В этих осадках сильно уменьшилась концентрация Ca (рис. 6).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в образцах 4046 и 4047 увеличилось содержание S и уменьшилось содержание Na. В обр. 4047 уменьшилась концентрация K (рис. 6).

Слабо увеличилось содержание Mg в образцах 4046 и 4047. Слабо увеличилось содержание Mn в обр. 4047 и P в обр. 4046. Слабо уменьшилось содержание Fe в образцах 4046 и 4047 и Mn в обр. 4046. В образцах 4046 и 4047 содержание Si сохранилось без изменения. В обр. 4046 неподвижными остались еще Ti, Al, K (рис. 6).

Микроэлементы. Сильно увеличилось содержание Mo в образцах 4046 и 4047, Ag в обр. 4047 и U в обр. 4046 (рис. 7).

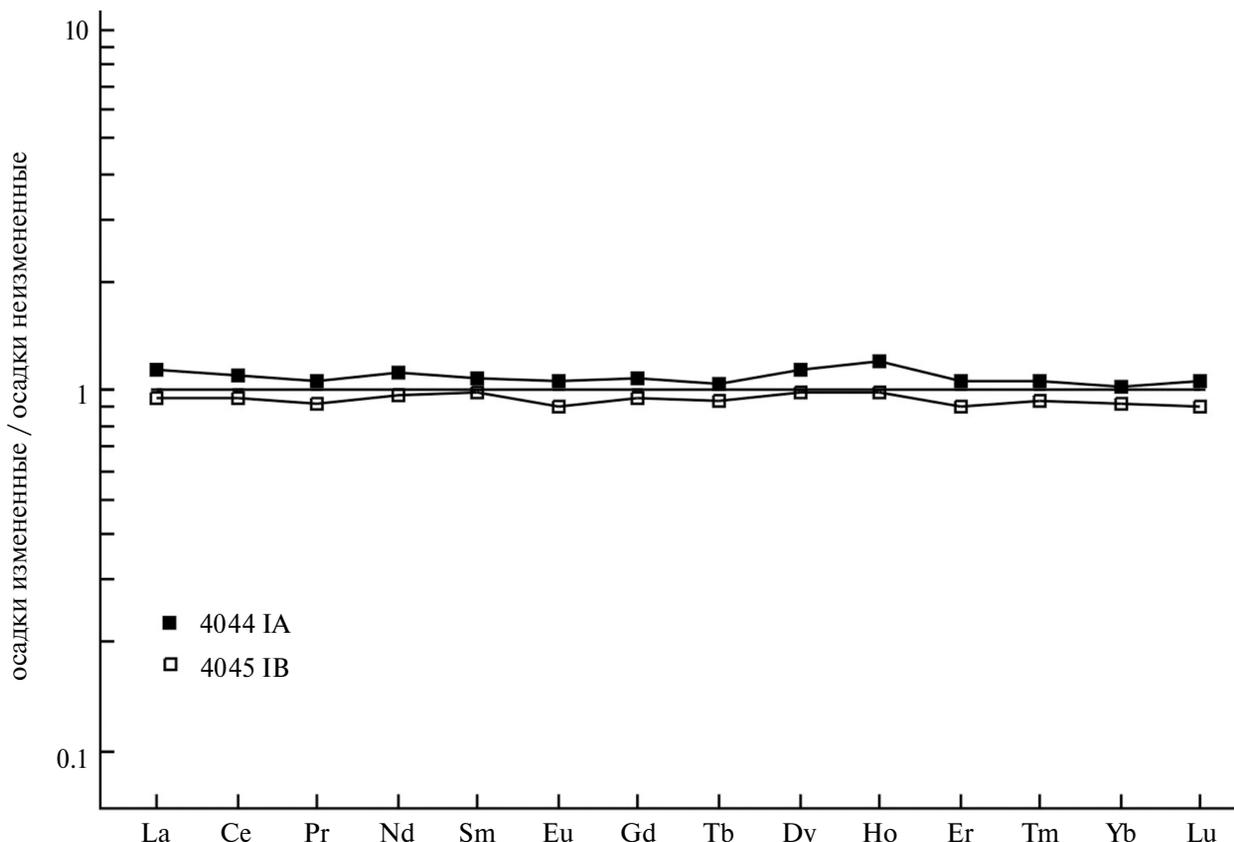


Рис. 4. Содержание редкоземельных элементов в осадках из скважины ODP 1036A (Толщи IA и IB).

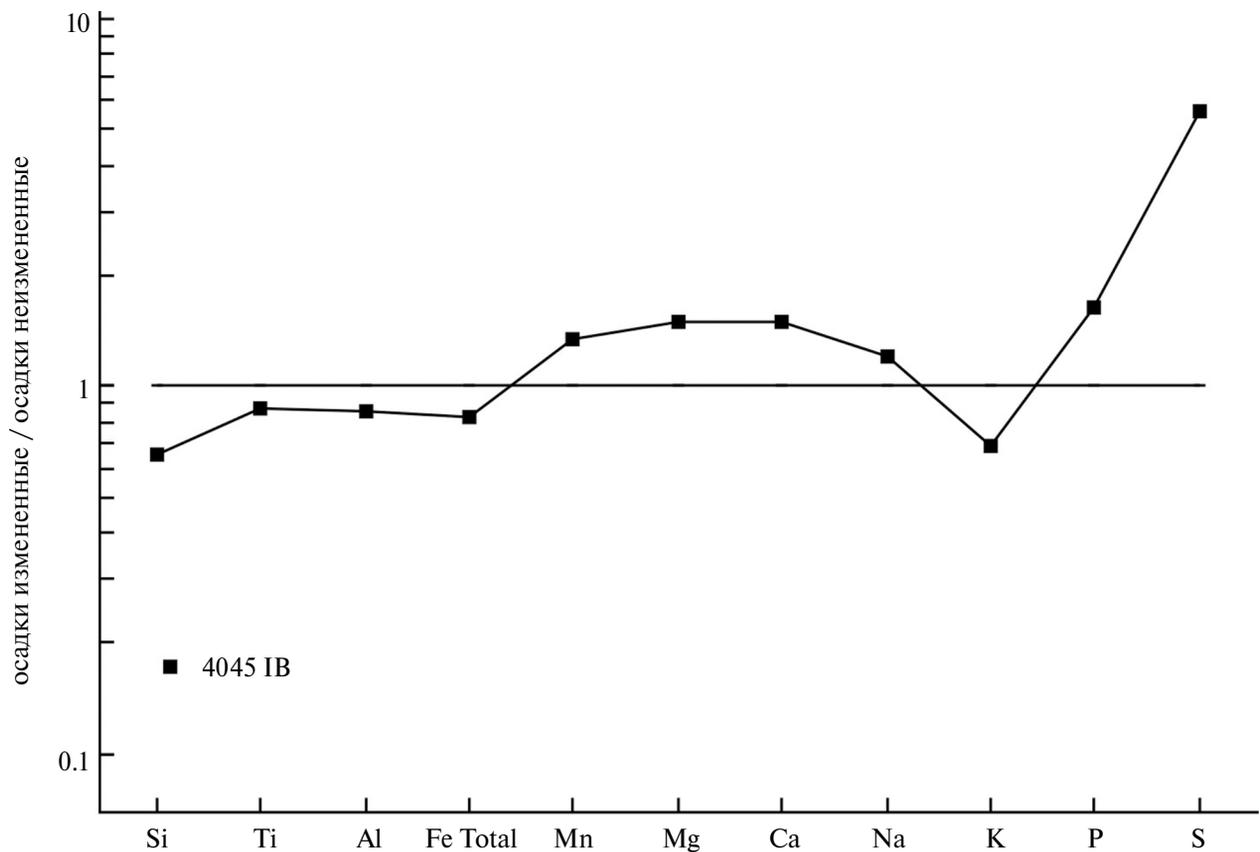


Рис. 5. Содержание макроэлементов в осадках из скважины ODP 1036A (Толща IB).

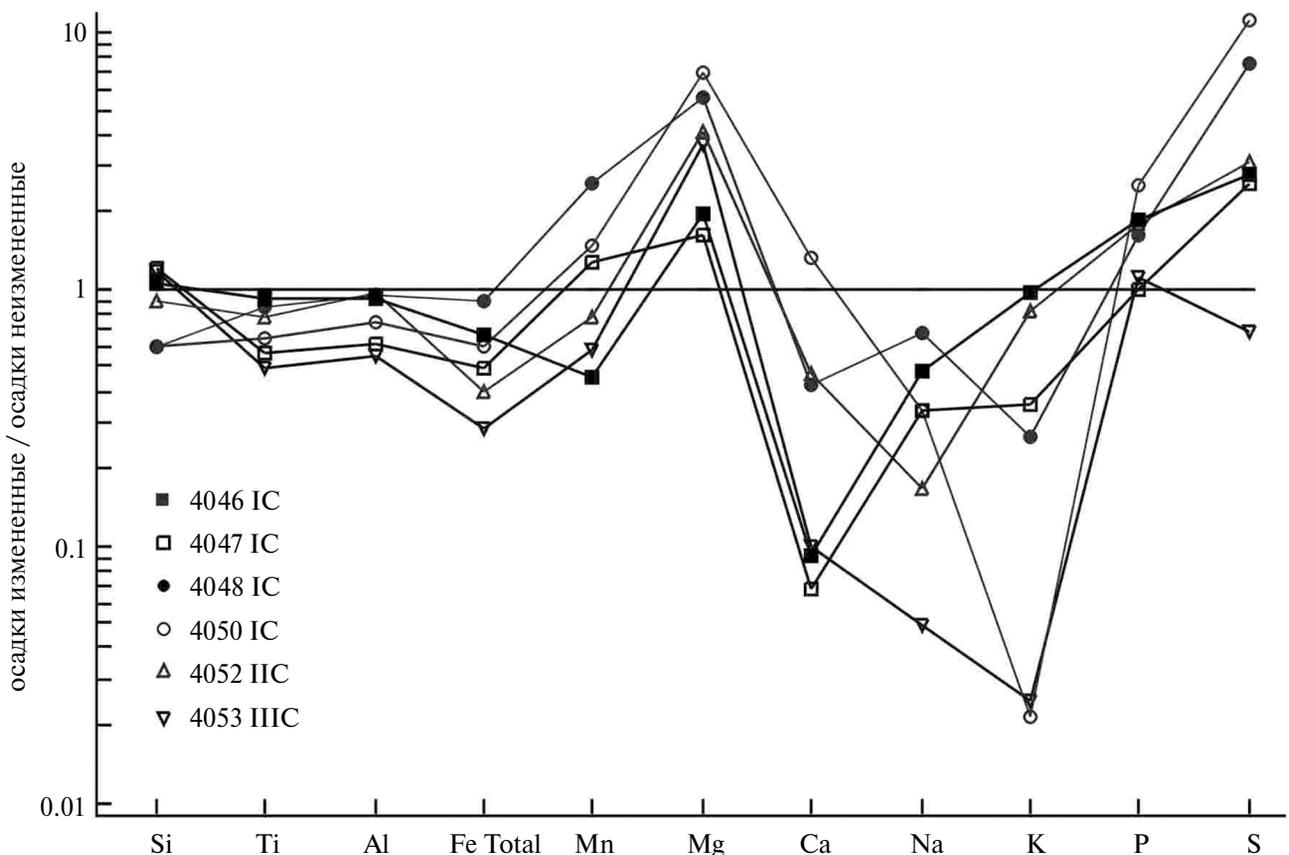


Рис. 6. Содержание макроэлементов в гидротермально измененных осадках из скважины ODP 1036A (Толщи IC и IIC).

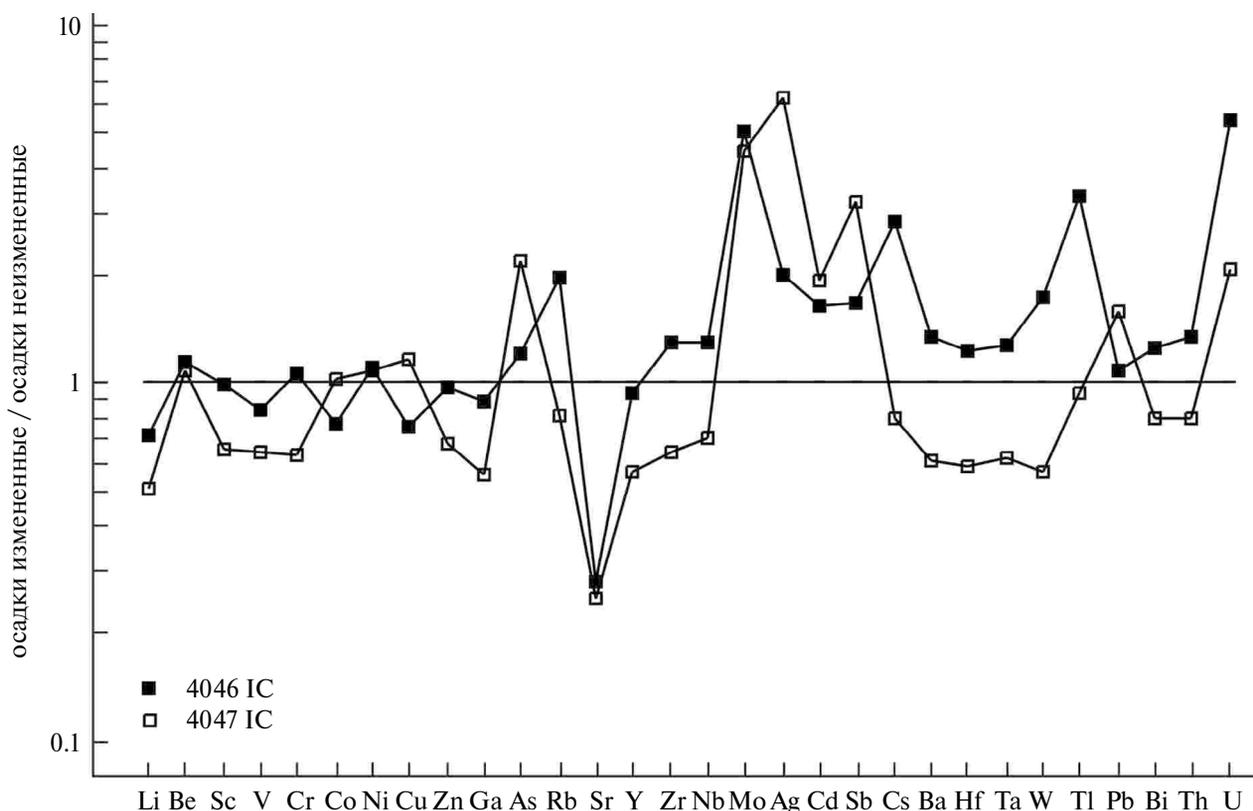


Рис. 7. Содержание микроэлементов в гидротермально измененных осадках верхней половины Толщи IC из скважины ODP 1036A.

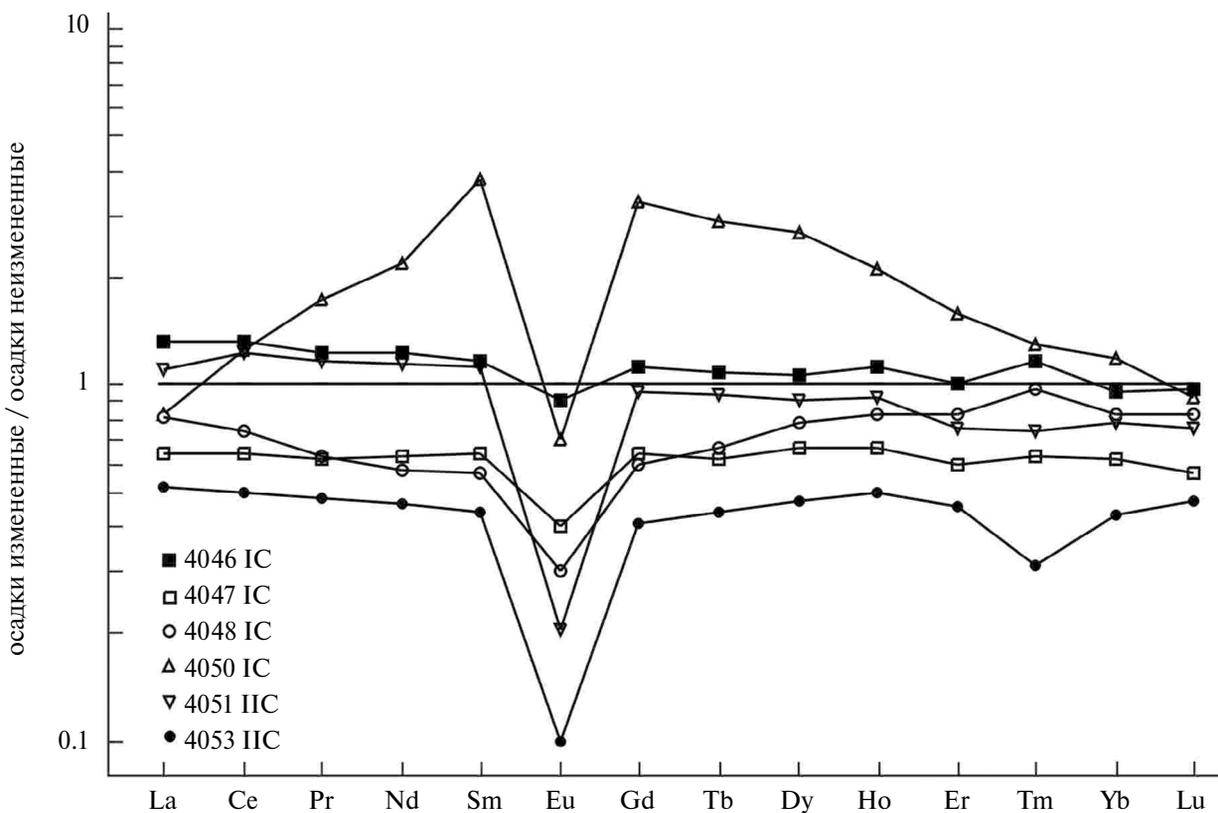


Рис. 8. Содержание редкоземельных элементов в гидротермально измененных осадках из скважины ODP 1036A (Толщи IC и IIC).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в образцах 4046 и 4047 уменьшилось содержание Sr. В обр. 4046 увеличилась концентрация Cs и Tl, а в обр. 4047 увеличилось содержание As, Sb (рис. 7)

Слабо увеличилось содержание As, Rb, Zr, Nb, Ag, Cd, Sb, Ba, Hf, Ta, W, Bi, Th в обр. 4046 и слабо уменьшилась в нем концентрация Li, V, Co, Cu, Ga. В обр. 4047 слабо увеличилось содержание Cu, Cd, Pb, U и слабо уменьшилась концентрация Li, Sc, V, Cr, Zn, Ga, Rb, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Bi, Th. Без изменения содержания сохранились Be и Ni в образцах 4046 и 4047, Sc, Cr, Zn, Y, Pb в обр. 4046, Co и Tl в обр. 4047 (рис. 7).

Редкоземельные элементы. В обр. 4046 содержание РЗЭ практически не изменилось по сравнению с их содержанием в неизмененных фоновых осадках (рис. 8) и в осадках Толщи IA и Толщи IB (рис. 4). В обр. 4047 проявилось слабое уменьшение концентрации всех РЗЭ, за исключением Eu. Его содержание уменьшилось на среднем уровне (рис. 8).

Толща IC

(нижняя половина, образцы 4048 и 4850)

Макроэлементы. В этих осадках сильно увеличилось содержание Mg и S, а в обр. 4050 сильно уменьшилась концентрация K (рис. 6).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в обр. 4048 увеличилось содержание Mn и в обр. 4050 увеличилось содержание P. В обр. 4048 уменьшилась концентрация Ca и K (рис. 6). Слабо увеличилось содержание Mn и Ca в обр. 4050. Слабо уменьшилось содержание Si в образцах 4048 и 4050, Ti, Al, Fe в обр. 4050 и Na в обр. 4048.

Не изменилась концентрация Ti, Al, Fe в обр. 4048 (рис. 6).

Микроэлементы. В осадках нижней половины Толщи IC сильно увеличилась концентрация Mo и U в образцах 4048 и 4050, и Cu, Zn, Cd, Tl в обр. 4048. В обр. 4050 сильно уменьшилось содержание Rb, Cs, Ba (рис. 9).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в образцах 4048 и 4850 в обр. 4048 увеличилась концентрация Ag, As и Sb, в обр. 4050 – Bi. Содержание Cu, Cd, Pb уменьшилось в обр. 4050, и Sr, Ba в обр. 4048 (рис. 9).

Слабо увеличилось содержание Zn, Y в обр. 4050, Pb в обр. 4048. Слабо уменьшилась концентрация Li в образцах 4048 и 4850, Rb, Y, Cs в обр. 4048, Be, Sc, V, As, Nb, Hf, Ta, W, Tl в обр. 4050. Не изменилась концентрация Be, Sc, V, Nb, Hf, Ta, W, Bi в обр. 4048, Sb в обр. 4050, Cr, Co, Ni, Ga, Zr, Nb, Th в образцах 4048 и 4050 (рис. 9).

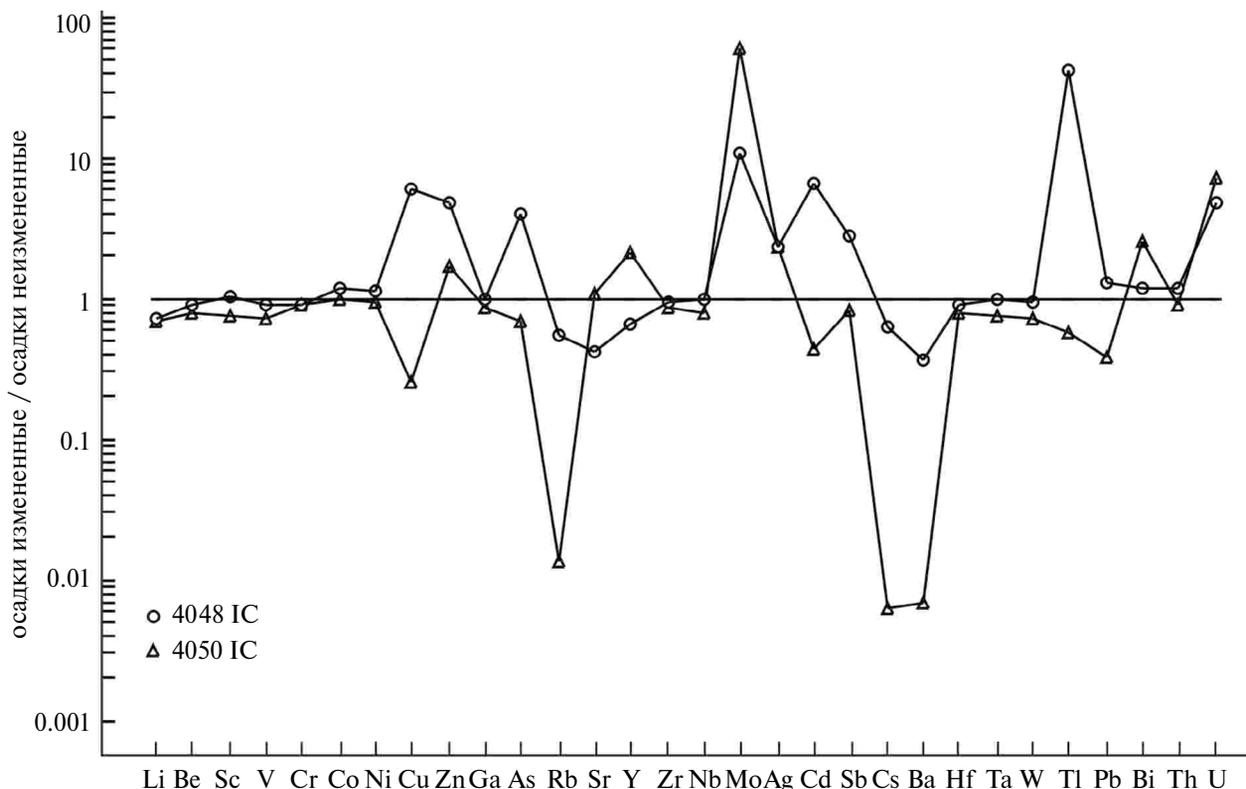


Рис. 9. Содержание микроэлементов в гидротермально измененных осадках нижней половины Толщи IC из скважины ODP 1036A.

Редкоземельные элементы. Содержание РЗЭ в обр. 4048 уменьшилось слабо, за исключением содержания Eu, примерно так же, как в обр. 4047 из осадков верхней половины Толщи IC. В обр. 4050 произошло изменение содержания РЗЭ, в основном увеличилось их содержание, которое не вписывается в общую закономерность постепенного уменьшения концентрации РЗЭ (сверху-вниз) в разрезе осадков из скважины 1036А, начиная от обр. 4048 и до обр. 4053, за исключением обр. 4052 (рис. 8).

Толща ПС (образцы 4052 и 4053)

Макроэлементы. В этих осадках так же, как в осадках из нижней половины Толщи IC, сильно увеличилось содержание Mg. Сильно уменьшилось содержание Ca, Na, K в обр. 4053 и Na в обр. 4052. Сильное уменьшение концентрации K в обр. 4053 по своей интенсивности одинаковое с уменьшением его концентрации в обр. 4050 из нижней половины Толщи IC (рис. 6).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в обр. 4052 увеличилось содержание S и уменьшилось содержание Ca. В образцах 4052 и 4053 уменьшилась концентрация Fe (рис. 6).

Слабо уменьшилась концентрация Ti и Mn в образцах 4052 и 4053, Si и K в обр. 4052, Al и S

в обр. 4053. В обр. 4052 слабо увеличилось содержание P. Сохранилось без изменения содержание Al в обр. 4052, а в обр. 4053 – Si и P (рис. 6).

В измененных осадках Толщи ПС содержание почти всех макроэлементов уменьшилось, включая слабое их уменьшение (рис. 6).

Микроэлементы. Сильно увеличилось содержание Ag и сильно уменьшилась концентрация Rb, Sr, Cs, Ba в обр. 4053, а также Sb в обр. 4052 (рис. 10).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в обр. 4052 увеличилась концентрация Mo и уменьшилась концентрация Sr, U. В обр. 4053 уменьшилось содержание V, Co, Ga, Y, W, Tl. В образцах 4052 и 4053 уменьшилось содержание Li, Sc, Cu, Zn, Cd, Pb (рис. 10).

Слабо увеличилась концентрация Co, Ni, Nb, Th в обр. 4052 и Mo в обр. 4053. Содержание остальных микроэлементов слабо уменьшилось или осталось без изменения (рис. 10).

В осадках Толщи ПС концентрация большого количества микроэлементов уменьшилась.

Редкоземельные элементы. В обр. 4053 наиболее заметно уменьшилось содержание РЗЭ в осадках из скважины 1036А, что соответствует тенденции постепенного сокращения их концентрации в осадках в Толще IC и Толще ПС с увеличением глубины.

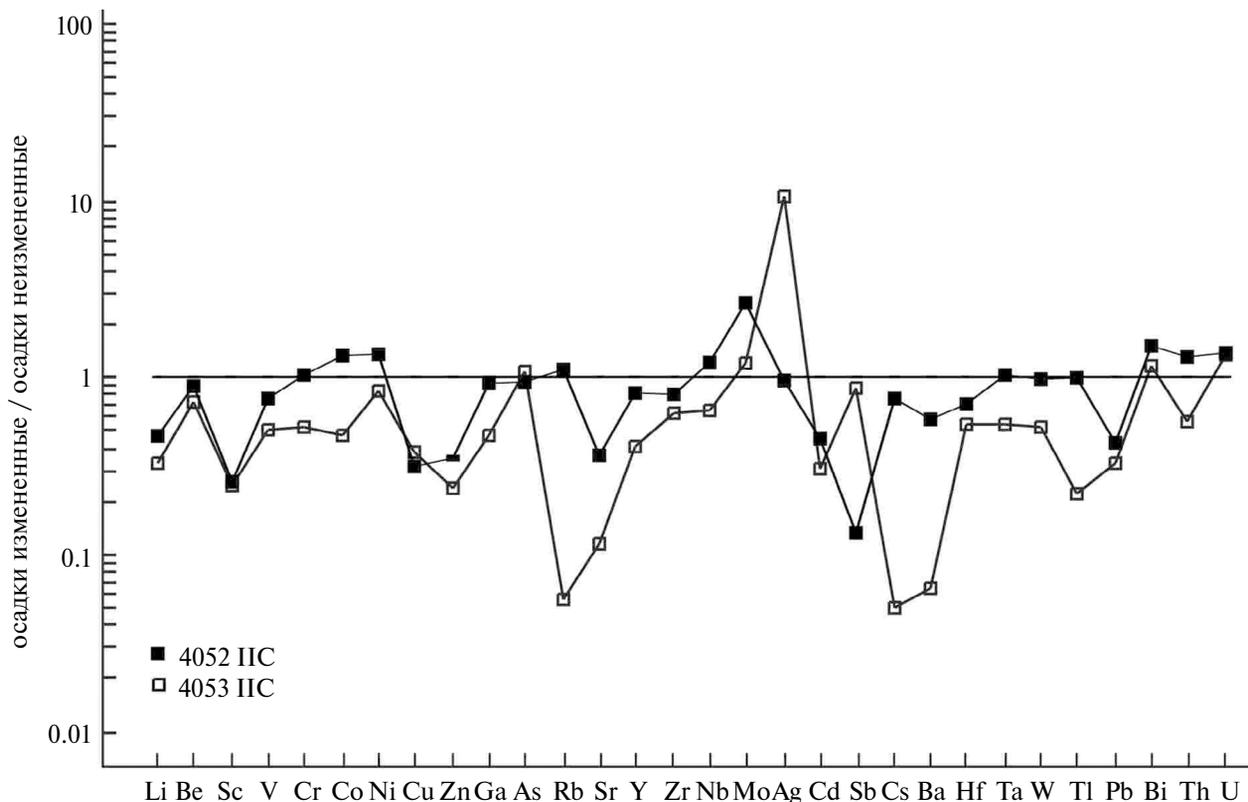


Рис. 10. Содержание микроэлементов в гидротермально измененных осадках Толщи ПС из скважины ODP 1036А.

В то же время, эта тенденция нарушена в обр. 4052, в котором содержание РЗЭ практически не отличается от их содержания в фоновых осадках и от их концентрации в осадках верхней части разреза (обр. 4046), за исключением содержания Eu, концентрация которого сильно сократилась (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температура в скважине 1036А. Температурный градиент. Температурный градиент в скважине 1036А такой же, как и в скважине 858В, и составляет 10°C/м [5, 9]. Это заключение основано на данных по распределению температуры в этих скважинах, пробуренных до глубины 38.50 м и 38.60 м в центре одной гидротермальной системы, на расстоянии 75 м друг от друга, рядом с гидротермальными источниками (рис. 1). Прежде всего, замеренные инструментально температуры в этих скважинах на одинаковых глубинах равны. В скважине 1036А на глубине 20 м замерена температура 200°C [8], в скважине 858В на глубине 19.5 м замерена температура 197°C [6]. Кроме того, по данным [13] в скважине 1036А на глубине 21.8 м температура 206°C и на глубине 27.8 м – 268°C. Эта разница в температурах 62°C при разнице в 6 м глубины их замера в скважине соответствует температурному градиенту 10°C/м.

Температура в Толщах IA и IB (6.10–10.04 м). В верхней части скважины 1036А, в Толщах IA и IB, температура не была определена. В то же время, в скважине 858В практически в таком же интервале глубин 1.97–10.41 м с неизменными терригенными осадками температура составляет ~17°C [3]. Учитывая одинаковый в осадках из этих скважин терригенный минеральный и сохранившийся неизменный химический составы осадков, можно считать, что эта температура ~17°C характерна и для Толщи IA в скважине 1036А.

В Толще IB в осадках проявлено небольшое изменение их химического состава, поэтому в ней температура может составлять ~50–70°C.

Верхняя половина Толщи IC (10.04–20 м). Температура в верхней половине Толщи IC не была определена. В то же время, в скважине 858В на глубине 16 м рассчитанная температура составляет ~112°C [3]. С учетом того, что в скважине 1036А температурный градиент такой же, как в скважине 858В, это значение температуры можно отнести и к верхней половине Толщи IC.

Нижняя половина Толщи IC (20–30.70 м). В скважине 1036А на глубине 21.8 м температура составляет 206°C и на глубине 27.8 м определена

температура 268°C [13]. Температура в нижней половине Толщи IC находится в пределах 200–270°C.

Толща IC (30.70–38.50 м). В скважине 1036А, ниже глубины 27.8 м, нет сведений о температуре. В то же время, в осадках из этой скважины на глубине 37.64 м новообразованные глинистые минералы представлены хлоритом [13]. Температура образования хлорита, по аналогии с температурой его образования в скважинах, пробуренных в спрединговом рифте на гидротермальном поле Рейкьянес в Исландии [10–12], может составлять 270°C и выше. В осадках из скважины 858В, пробуренной до глубины 38.60 м, в нижней части которой установлен также новообразованный хорошо окристаллизованный хлорит [3, 13], температура его образования от 270°C до 320–330°C [3, 5, 9].

Степень изменения химического состава осадков при низкой температуре. Толща IA (6.10–9.20 м). Влияния гидротермального флюида на химический состав осадков Толщи IA не произошло. При температуре ~17°C содержание большинства химических элементов в этих осадках или слабо увеличилось или не изменилось по сравнению с их содержанием в фоновых неизменных терригенных осадках (рисунки 3, 4). Заметное увеличение в этих осадках концентрации Ag, Cu, Cd, Ba, Pb, U связано с обломками обрушения сульфидной трубы “черного курильщика”, около которого пробурена скважина 1036А. Из этих обломков рудной трубы состоит толща IV, они встречены также в Толще IA. Не исключено, что слабое увеличение в осадках Толщи IA содержания Ni, Zn, Mo, Sb, Cs, W, Tl, Bi также связано с примесью в них этих обломков.

Толща IB (9.20–10.04 м). При температуре ~50–70°C влияние гидротермального флюида на изменение химического состава этих осадков было слабое, оно привело к заметному изменению концентрации небольшого количества химических элементов S, Mo, Ba и Tl (рисунки 3, 5). Кроме того, влияние гидротермального раствора на изменение химического состава этих осадков, по-видимому, проявилось в слабом уменьшении содержания большинства микроэлементов, в отличие от осадков Толщи IA, в которых слабо уменьшилось содержание всего нескольких микроэлементов (рис. 3). В осадках Толщи IB не изменилось содержание редкоземельных элементов по сравнению с их содержанием в фоновых неизменных терригенных осадках, как и в осадках Толщи IA (рис. 4).

Низкие температуры в Толщах IA и IB можно объяснить проникновением холодной морской воды в эти осадки.

Изменение химического состава осадков при высокой температуре. Основное изменение химического состава осадков из скважины 1036A на уровне сильной и средней интенсивности увеличения/уменьшения содержания химических элементов произошло в Толщах IC и IC в системе взаимодействия гидротермальный флюид–порода. Соответственно, рассмотрение изменения химического состава осадков при быстром увеличении температуры вниз по разрезу осадков из скважины 1036A целесообразно было провести для Толщ IC и IC.

Толща IC (верхняя половина, 10–20 м). При температуре ~112°C в осадках сильно увеличилась концентрация Mo, Ag, U и сильно уменьшилось содержание Ca. На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков увеличилось содержание S, Cs, Tl, As, Sb и сократилась в них концентрация Na, K, Sr, Eu (табл. 4).

Таким образом, при этой температуре существенно изменилось содержание только небольшого количества химических элементов.

Относительно низкая температура в осадках Толщи IC также связана с проникновением в них морской воды, но уже с меньшим охлаждающим воздействием, чем на вышележащие осадки (Толщи IA и IB), из-за постепенного ее разогревания при миграции вниз по разрезу осадков.

Толща IC (нижняя половина, 20–30.70 м). При температуре до 200–270°C произошло в основном сильное и среднего уровня увеличение содержания большого количества химических элементов в осадках. Сильно увеличилась концентрация Mg, S, U, Mo, Cu, Zn, Cd, Tl. На среднем уровне интенсивности изменения химического состава осадков увеличилось содержание Mn, P, Ag, As, Sb, Bi, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho (табл. 4). Соответственно этими элементами обеднел раствор, взаимодействующий с осадками. Концентрация только небольшого количества химических элементов Ca, Rb, Sr, Sc, Ba, Cu уменьшилась

Таблица 4. Соотношение между температурой и изменением содержания химических элементов в гидротермально измененных осадках из скважины ODP 1036A по сравнению с их содержанием в исходных неизмененных осадках из скважины ODP 1037B

Толща	Образец	Глубина отбора образца в скважине, м	Температура	Химические элементы, содержание которых сильно увеличилось (в 4 раза и больше)	Химические элементы, содержание которых увеличилось в пределах от 2 до 4 раз	Химические элементы, содержание которых сильно уменьшилось (в 4 раза и больше)	Химические элементы, содержание которых уменьшилось в пределах от 2 до 4 раз
IC (верхняя половина: 10.04–20 м)	4046	14.85	~112°C	Mo, U	S Cs, Tl	Ca	Na Sr
	4047	18.50		Mo, Ag	S As, Sb	Ca	Na, K Sr Eu
IC (нижняя половина: 20–30.70 м)	4048	22.60	200–270°C	Mg, S U, Cu, Zn, Mo, Cd, Tl	Mn Ag, As, Sb		Ca, K Sr, Ba Eu
	4050	28.10		Mg, S Mo, U	P Ag, Bi Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho	K Rb, Cs, Ba	Cu
IC 30.70–38.5 м	4052	31.90	270–330°C	Mg	S Mo	Na, Sb	Fe, Ca, Li, Sc, Cu, Zn, Pb, Sr Eu
	4053	33.07		Mg Ag		Ca, Na, K Rb, Sr, Cs, Ba Eu	Fe Li, Sc, Cu, Zn, Pb, V, Co, Ga, Y, W, Tl Nd, Sm, Gd, Tb, Er, Tm, Yb, Lu

в осадках (табл. 4), что сопровождалось слабым обогащением раствора этими элементами.

Толща ПС (30.70–38.50 м). При температуре 270–330°C в этих осадках произошло сильное уменьшение содержания большинства элементов. В обр. 4052 сильно сократилась концентрация Na, Sb и на среднем уровне интенсивности изменения химического состава осадков уменьшилось содержание Fe, Ca, Na, Li, Sc, Cu, Zn, Cd, Pb, Eu. В обр. 4053 количество химических элементов, содержание которых уменьшилось, существенно выросло по сравнению с обр. 4052. В обр. 4053 сильно уменьшилось содержание Ca, Na, K, Rb, Sr, Cs, Ba, Eu. В нем на среднем уровне интенсивности изменения химического состава осадков уменьшилось содержание Fe, Li, Sc, Cu, Zn, Cd, Pb, V, Co, Ga, Y, W, Tl, Nd, Sm, Gd, Tb, Er, Tm, Yb, Lu (табл. 4).

Изменение концентрации химических элементов в осадках Толщи ПС принципиально отличается от изменения содержания химических элементов в осадках нижней половины Толщи ПС. В осадках нижней половины Толщи ПС значительно больше привнесенных химических элементов, чем вынесенных, что указывает на уменьшение содержания этих элементов в гидротермальном флюиде. В осадках Толщи ПС, напротив, привнесенных химических элементов всего четыре и очень большое количество вынесенных элементов, что привело к существенному обогащению этими элементами гидротермального флюида в процессе взаимодействия раствор–порода.

Преобразование химического состава осадков, находящихся в осадочном покрове ниже глубины 38.50 м. Ниже глубины 38.50 м, на которой остановлено бурение скважины 1036А, из-за большой температуры в ней, в осадочном чехле, мощность которого в районе гидротермального поля составляет 250–300 м, температура может достигать 400°C и выше в соответствии с высоким температурным градиентом (10°C/м) в этой скважине. Можно предположить, что при таких температурах в этой преобладающей части разреза плейстоценовых осадков осадочного покрова в процессе их взаимодействия с гидротермальным флюидом происходит сильное уменьшение содержания большинства химических элементов так же, как в осадках Толщи ПС (30.70–38.50 м), или еще более интенсивное.

Соответственно, при взаимодействии высокотемпературного гидротермального флюида с осадками, прилегающими к каналу подъема и разгрузки раствора в центре гидротермальной

системы и находящимися в осадочном покрове в интервале от 30.70 м до 250–300 м, существенное уменьшение содержания химических элементов в осадках оказывает основное влияние на формирование состава гидротермального рудообразующего флюида. Гидротермальный флюид при взаимодействии с этими осадками обогащается большим количеством химических элементов.

Влияние латеральных потоков гидротермальных растворов и морской воды на изменение химического состава осадков. Существование латеральных потоков растворов и морской воды в океанских гидротермальных системах в настоящее время не вызывает сомнений. Эти потоки характерны также для зон, прилегающих к центральному каналу подъема и разгрузки гидротермального флюида.

В скважине 858В, которая близка по своему местоположению в центральной части гидротермальной системы скважине 1036А, показано, что карбонатные конкреции формируются в условиях проникновения в осадки латеральных потоков морской воды [5, 9]. В скважине 1036А в осадках Толщ ИВ, ИС, ПС присутствуют карбонатные конкреции. В осадках Толщ ИС и ПС присутствуют также ангидритовые конкреции, которые формируются при смешении горячего богатого кальцием флюида и холодной богатой сульфатом морской воды или при нагревании морской воды [4, 8, 14].

Существованием латеральных потоков растворов и морской воды можно объяснить пестроту в изменении химического состава осадков в пределах Толщ ИС и ПС (рисунки 6–10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения химического состава верхнеплейстоценовых осадков из скважины 1036А, пробуренной в центре высокотемпературной гидротермальной системы, на гидротермальном поле “Мертвая собака”, в зоне, прилегающей к каналу подъема и разгрузки гидротермального флюида и его взаимодействия с осадками, установлено, что наиболее существенные изменения химического состава осадков произошли в интервале 20–30.70 м (нижняя половина Толщи ИС) при температуре 200–270°C и в самом низу скважины, в интервале 30.70–38.5 м (Толща ПС), при температуре 270–330°C. В этих интервалах изменение химического состава осадков проявилось по-разному. В интервале 20–30.70 м увеличилась концентрация большого количества химических

элементов: Mg, S, Mn, P, Mo, U, Cu, Zn, As, Cd, Tl, Ag, Sb, Bi, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Но и соответственно произошло обеднение гидротермального флюида этими элементами. В интервале 30.70–38.5 м, напротив, концентрация большинства химических элементов уменьшилась: Fe, Ca, Na, K, Sb, Rb, Sr, Cs, Ba, Li, Sc, Cu, Zn, Cd, Pb, Sr, V, Co, Ga, Y, W, Tl, PЗЭ, что привело к существенному обогащению гидротермального флюида этими элементами.

На основании высокого температурного градиента ($10^\circ \text{C}/\text{м}$) в высокотемпературных условиях от $270\text{--}330^\circ\text{C}$ до 400°C и выше, при взаимодействии раствор–осадки, в осадочном покрове мощностью 250–300 м, начиная от глубины 30.70 м и до его основания, может происходить интенсивное обеднение осадков многими химическими элементами. Соответственно, это уменьшение содержания химических элементов оказывает основное влияние на формирование состава гидротермального флюида, мигрирующего через осадочный покров в канале его подъема и разгрузки.

Полученные результаты исследования изменения химического состава осадков из скважины 1036А являются базовыми при изучении преобразования осадков, прилегающих к каналам подъема и разгрузки на дне гидротермального флюида в центрах циркуляционных долгоживущих высокотемпературных гидротермальных систем в спрединговых океанских рифтах, перекрытых осадками большой мощности.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Г.Н. Новикову за подготовку образцов пород для анализа их химического состава.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного плана научно-исследовательских работ (Геологический институт Российской Академии наук) по теме № 122011800645-0.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.Ю., Бурмий Ж.П. Использование высокообогащенных стабильных изотопов в массовом анализе образцов горных пород, грунтов, почв и донных отложений методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 7. С. 6–15.
2. Курносов В.Б., Коновалов Ю.И., Галин К.Р. Химический состав осадков и его изменения в центре современной гидротермальной системы в Срединной Долине океанического хребта Хуан де Фука, скважина 858В ODP // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 1. С. 50–60.
3. Сахаров Б.А., Курносов В.Б. Особенности образования глинистых минералов в осадках из центра гидротермальной системы, скважина 858В, хребет Хуан де Фука // Литология и полезные ископаемые. 2022. № 2. С. 181–204.
4. Bischoff J.L., Seyfried W.E. Hydrothermal chemistry of seawater from 25° to 350°C // American Journal of Science. 1978. V. 278. P. 838–860.
5. Buatier M.D., Karpoff A.-M., Boni M, et al. Mineralogical and petrographic records of sediment-fluid interaction in the sedimentary sequence at Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, Leg 139 // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 1994. V. 139. P. 133–154.
6. Davis E.E., Mottl M.J., Fisher A.T. et al. Init. Repts. 1992. V. 139. College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1026 p.
7. Davis E.E., Villinger H. Tectonic and thermal structure of the Middle Valley sedimented rift, northern Juan de Fuca Ridge // Init. Repts. 1992. V. 139. College Station, TX (Ocean Drilling Program). P. 9–41.
8. Fouquet Y., Zierenberg R.A., Miller D.J. et al. Proc. ODP. Init Repts. 1998. V. 169. College Station, TX (Ocean Drilling Program).
9. Frü-Green G.L., McKenzie J.A., Boni M. et al. Stable isotope and geochemical record of convective hydrothermal circulation in the sedimentary sequence of Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, Leg 139 // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 1994. V. 139. P. 291–306.
10. Kristmannsdottir H. Clay minerals formed by hydrothermal alteration of basaltic rocks in Iceland geothermal fields // Geol. Fören Stockholm. 1975. V. 97. P. 289–292.
11. Kristmannsdottir H. Types of clay minerals in hydrothermally altered basaltic rocks, Reykjanes, Iceland // Jökull. 1976. V. 26. P. 30–39.
12. Kristmannsdottir H. Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at $100\text{--}300^\circ\text{C}$ // Clay Conf., 1978 / Mortland M.M., Farmer V.C. (eds). Amsterdam: Elsevier, 1979. P. 359–367.
13. Lackschewitz K.S. & Singer A. Formation and transformation of clay minerals in the hydrothermal deposits of Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, ODP Leg 169 // Economic Geology. 2000. V. 95. P. 361–389.
14. Seyfried W.E., Bischoff J.L. Low temperature basalt alteration by seawater: An experimental study at 70°C and 150°C // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1979. V.43. № 12. P. 1937–1947.
15. Zierenberg R.A., Fouquet Y., Miller D.J. et al. Proc. ODP, Sci. Results. 2000. V. 169. College Station TX (Ocean Drilling Program).

**CHANGES IN THE COMPOSITION OF UPPER
PLEISTOCENE SEDIMENTS IN THE CENTER OF THE
ACTIVE HYDROTHERMAL SYSTEM (MIDDLE VALLEY,
JUAN DE FUCA RIDGE, PACIFIC OCEAN)**

V. B. Kurnosov*, **Yu. I. Konovalov**, **K. R. Galin****

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

** e-mail: vic-kurnosov@rambler.ru*

*** e-mail: kongsalin@yandex.ru*

The article presents the results of studying the changes in the chemical composition of the Upper Pleistocene sediments from the Hole ODP 1036A, drilled in the Middle Valley of the Juan de Fuca oceanic ridge at the Dead Dog hydrothermal field to a depth of 38.50 m, 9 m from the “black smoker” with a temperature of 268°C. The most significant changes in sediment chemistry occurred in the lower intervals of the hole. In the interval 20–30.70 m, the concentration of a large number of chemical elements increased and, accordingly, the hydrothermal fluid was depleted of these elements. In the interval 30.70–38.5 m, on the contrary, the concentration of most chemical elements decreased, which led to a significant enrichment of hydrothermal fluid with these elements.

Keywords: hydrothermal system, Juan de Fuca oceanic ridge, hydrothermal alteration of sediments, water-rock interaction, deep sea drilling