

УДК 550.424

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА РАСТВОРА ПРИ ЕГО ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ОСАДОЧНЫЙ ПОКРОВ В ЦЕНТРЕ СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (ХРЕБЕТ ХУАН ДЕ ФУКА, ТИХИЙ ОКЕАН, СКВАЖИНА ODP 858B)

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

Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

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

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 22.09.2023 г.

Принята к публикации 03.11.2023 г.

В статье приведены результаты изучения изменения состава гидротермального раствора при его прохождении через плейстоценовые осадки из скважины ODP 858B глубиной 38.6 м, которая пробурена в северном сегменте Срединной Долины хребта Хуан де Фука, на гидротермальном поле “Dead Dog”, в 20 м от гидротермального источника с температурой 276°C. Установлено влияние осадков Толщ I, ПВ, ПД из этой скважины на изменение состава раствора в процессе взаимодействия раствор–осадки. Наибольшее влияние на состав раствора произошло при его взаимодействии с осадками Толщ ПВ и ПД в высокотемпературных условиях (200–350°C), которое выражено в обогащении раствора большим количеством химических элементов. Показано возможное изменение состава раствора в процессе взаимодействия раствор–осадки при его прохождении через весь осадочный покров мощностью 250–300 м.

Ключевые слова: океанская гидротермальная система, хребет Хуан де Фука, изменение состава раствора, взаимодействие раствор–осадки, глубоководное бурение, гидротермальные источники.

DOI: 10.31857/S0024497X24020021, **EDN:** zbzuks

Срединно-океанические хребты находятся на большом расстоянии от континентов, которые являются основными источниками осадочного материала. Осевые зоны этих хребтов не перекрыты осадочным чехлом и горячие растворы разгружаются на дне, которое сложено базальтами. Напротив, океанические хребты, расположенные вблизи континентов, перекрыты четвертичными осадками мощностью в сотни метров. В них, в центрах спрединга, конвективные гидротермальные системы охватывают как кристаллический фундамент, так и осадочный покров, в котором в процессе взаимодействия вода–порода, происходит изменение вещественного состава осадков и химического состава растворов. Наиболее интенсивно этот процесс проявлен на участках осадочного покрова, расположенных рядом с гидротермальными источниками, в зонах подъема горячих растворов с последующей их разгрузкой на дне в виде “черных курильщиков”.

Способ определения влияния осадочного покрова на изменение состава гидротермальных

рудобразующих растворов, мигрирующих через него в зоне подъема горячего раствора и разгружающегося на дне в виде “черного курильщика”, был предложен Ю.А. Богдановым с соавторами [Богданов, Сагалевиц, 2002; Богданов и др., 2006]. Это влияние было ими определено по разнице между составом гидротермального источника на 27° с.ш. Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) в южном трого впадины Гуаймас Калифорнийского залива, заполненного плейстоценовыми осадками мощностью около 600 м, и составом гидротермального источника на 21° с.ш. ВТП, где нет осадочного чехла. Предложенный способ основан на допущении, что состав раствора, поступающего из базальтового фундамента в осадочный покров в южном трого впадины Гуаймас, и химический состав раствора гидротермального источника на 21° с.ш. ВТП схожи. Этот способ не точен. В то же время, возможная ошибка будет систематической при оценке изменения химического состава гидротермального раствора при его прохождении

через весь осадочный покров в гидротермальных системах разных хребтов северо-восточной части Тихого океана, что позволит проводить сравнение изменения в них состава раствора, прошедшего через осадочный покров, с использованием единого репера.

Исследование с использованием химического состава гидротермального источника на 21° с.ш. ВТП было проведено на фланге гидротермальной системы также в южном трого впадины Гуаймас Калифорнийского залива, где пробурена скв. DSDP 477/477A глубиной 272 м [Блинова, Курносов, 2015; Курносов, Блинова, 2015], которая находится на значительном расстоянии от гидротермального источника, примерно в 300 м от него [Богданов и др., 2006]. В этой скважине высокотемпературная зона с температурой около 300°C установлена в интервале 184–272 м [Currey et al., 1982; Kelts, 1982; Блинова, Курносов, 2015].

Таким образом, в первом случае [Богданов, Сагалевиц, 2002; Богданов и др., 2006] есть гидротермальный источник, но нет рядом скважины, а во втором случае [Блинова, Курносов, 2015; Курносов, Блинова, 2015], напротив, есть глубоководная скважина, но нет рядом гидротермального источника. Для полного комплексного исследования необходим объект, на котором есть и “черный курильщик”, и скважина, пробуренная около него.

Такому условию удовлетворяет район в Срединной Долине хребта Хуан де Фука с осадочным покровом мощностью 250–300 м, где на гидротермальном поле “Dead Dog” впервые в океане рядом с гидротермальным источником пробурена скв. ODP 858B. Она расположена в 20 м от источника с температурой 276°C [Currey et al., 1982].

На сегодняшний день на объекте, на котором глубоководная скважина пробурена рядом с “черным курильщиком”, изменение состава рудообразующих растворов при их прохождении через осадочный покров и в процессе взаимодействия раствора с осадками, находящимися в непосредственной близости от канала подъема горячего флюида с последующей разгрузкой на дне, не изучена. Оценка привноса/выноса химических элементов дана лишь для одного образца на весь 38-метровый разрез осадков (скв. ODP 858B) [Goodfellow, Peter, 1994]. Кроме того, количество вовлеченных в изучение микроэлементов было ограничено возможностями того времени метода рентгено-флюоресцентного анализа, редкоземельные элементы не были изучены.

Статья посвящена оценке изменения химического состава раствора в процессе его взаимодействия с осадками при его прохождении через осадочный покров в центре спрединга, в осадках непосредственно прилегающих к каналу подъема гидротермального флюида в гидротермальной системе, расположенной в северном сегменте Срединной Долины хребта Хуан де Фука, где на гидротермальном поле “Dead Dog” рядом находятся “черный курильщик” с температурой 276°C и скв. ODP 858B глубиной 38.6 м, пробуренной в плейстоценовых осадках.

Основные задачи, на решение которых направлена статья.

1. Определить возможное изменение химического состава гидротермального раствора при его прохождении через весь осадочный покров мощностью 250–300 м по разнице химического состава гидротермального источника, находящегося рядом со скв. ODP 858B на гидротермальном поле “Dead Dog”, и химического состава гидротермального источника на 21° с.ш. ВТП, где нет осадочного чехла.

2. Установить изменение средних содержаний химических элементов в гидротермально измененных осадках в Толщах I, IIВ и IIД и оценить влияние каждой из них на заключительном этапе изменения состава раствора при его прохождении в верхней части разреза осадочного покрова, пробуренного скважиной ODP 858B на глубину 38.6 м.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержание макроэлементов в плейстоценовых осадках из скв. ODP 858B, пробуренной рядом с гидротермальным источником, а также в неизмененных осадках из скважин ODP 855A, C, D, определено рентгено-флюоресцентным методом (РФА) в лаборатории химико-аналитических исследований в Геологическом институте РАН. Содержание в осадках микроэлементов, включая редкоземельные элементы (РЗЭ), определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС) в лаборатории ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа в Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН.

Просмотр петрографических шлифов проведен в оптическом микроскопе ВЮptic-100.

Гранулометрический анализ: пелитовые фракции (<0.001 мм и 0.01–0.001 мм) были выделены

из осадков методом отмучивания в стеклянных цилиндрах; фракция <math><0.001\text{ м}</math> – слив верхних 7 см суспензии через каждые 24 часа; фракция 0.01–0.001 мм – слив верхних 10 см суспензии через каждые 20 мин; фракции алевритовые (0.05–0.01 мм и 0.1–0.05 мм), песчаные (0.25–0.1 мм, 0.5–0.25 мм, 1–0.5 мм), а также фракция размерностью >1 мм, получены ситованием остатков образца после полного выделения из него пелитовых фракций.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Срединная Долина хребта Хуан де Фука (рис. 1а) является тектономагматической структурой среднескоростного спрединга (58 мм/год) [Davis et al., 1992; Davis, Villinger, 1992]. В ней расположено гидротермальное поле “Dead Dog”

размером 800 · 400 м с высоким тепловым потоком (до 835 мВт/м²) и с 15 гидротермальными металлоносными источниками на дне с температурой от 268 до 276°C [Davis, Villinger, 1992]. В районе гидротермального поля в Срединной Долине накопилось 250–300 м плейстоценовых гемипелагических осадков с редкими прослоями дистальных турбидитов [Davis et al., 1992]. На этом гидротермальном поле в 20 м от гидротермального источника с температурой 276°C расположена скв. ODP 858В (см. рис. 1б), пробуренная в осадочном покрове до глубины 38.6 м (рис. 2). Эта скважина первая, пробуренная в океане в непосредственной близости от “черного курильщика”. В ней на глубине 19.5 м замерена температура 197°C [Davis et al., 1992] и установлен высокий температурный градиент 10°C/м [Buatier et al., 1994; Frü-Green et al., 1994].

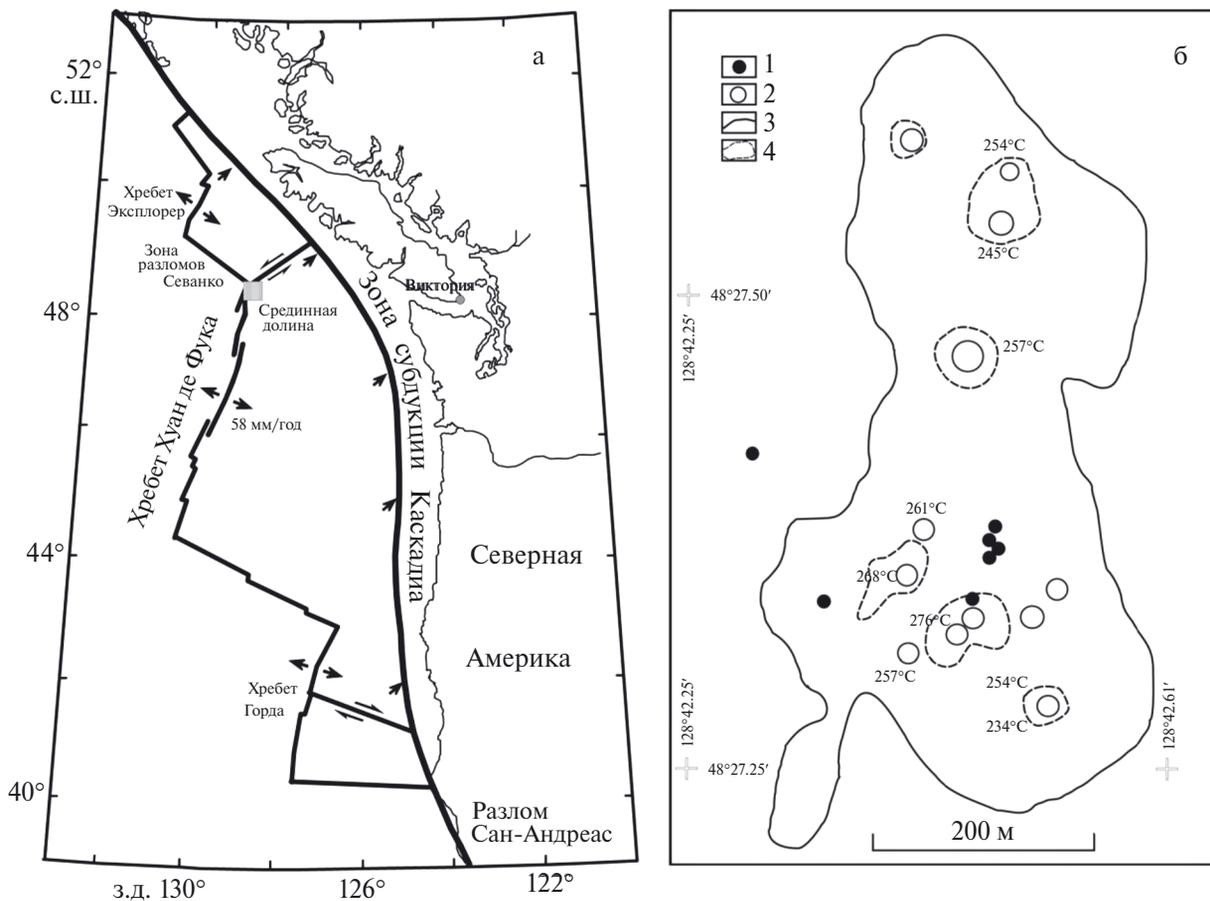


Рис. 1. Структурно-тектоническая схема Срединной Долины хребта Хуан де Фука в северо-восточной части Тихого океана [Davis et al., 1992], стрелки показывают направление движения плит (а) и расположение скважин ODP 858А, В, С, D, F, G, гидротермальных источников и гидротермальных холмов в районе гидротермального поля “Dead Dog” [Davis et al., 1992] (б).

1 – ODP скважины, 2 – гидротермальные источники, 3 – акустический край гидротермального поля, 4 – границы гидротермальных отложений.

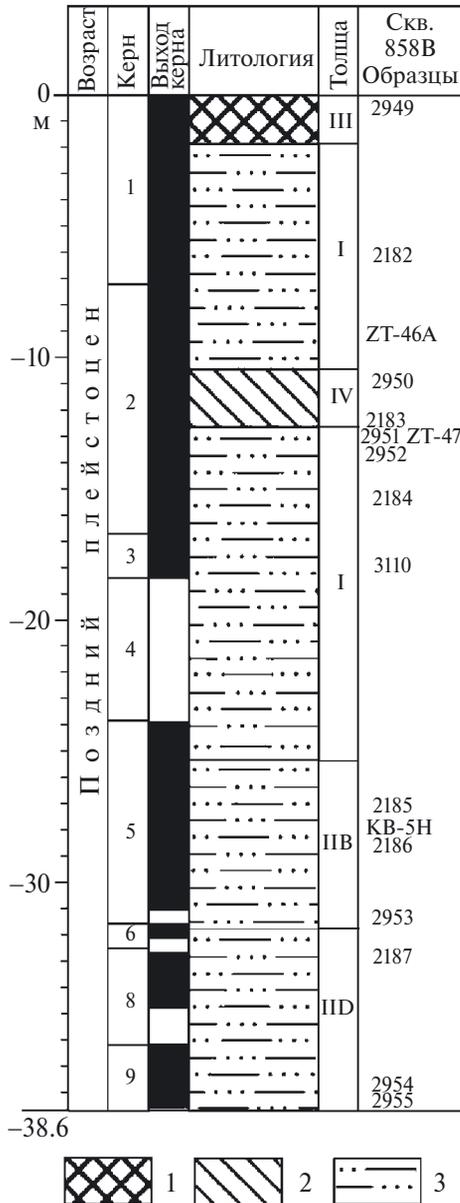


Рис. 2. Литологическая колонка скважины 858В с расположением образцов.
1 – металлоносные осадки; 2 – сульфиды; 3 – алеврито-глинистые гемипелагические осадки.

Скважины ODP 855A, C, D расположены у подножия восточного борта Срединной Долины в районе с низким тепловым потоком. Эти скважины пробурены в неизменных фоновых осадках с поровой холодной морской водой [Davis et al., 1992].

Осадки из скважин, которые были пробурены в рейсе 139 ODP, участники рейса разделили на Толщи I, II, III, IV [Davis et al., 1992]. Их состав определен во время

рейса при визуальном описании керна и при изучении в оптическом микроскопе. Осадки из скв. ODP 858В они разделили на Толщи I, II, III, IV (см. рис. 2).

Толща I (1.97–10.41 м и 12.70–25.31 м) – неизменные осадки, состоящие из глины, алеврита, песчанистого алеврита, редких тонких прослоев алевритовых тонкозернистых песков (дистальные турбидиты), содержат слюды, амфиболы, циркон, в небольших количествах локально присутствуют пирит, кальцит, глауконит, непрозрачные рудные минералы и биогенные компоненты (фораминиферы, диатомеи, радиолярии, наннофоссилии).

Толща II (25.31–31.83 м) – брекчированные гемипелагические аргиллиты с редкими прослоями дистальных тонкозернистых турбидитов. В осадочных породах встречены ангидрит и карбонаты, локальные концентрации сульфидов (около 2% объема осадка).

Толща III (31.83–38.60 м) – окремненные, гидротермально измененные аргиллиты и алевролиты, содержат рассеянный пирит (до 5%), примесь кварца, полевых шпатов, слюды, цеолита, жилки ангидрита. Небольшие редкие пустоты заполнены ангидритом. Локально встречается примесь сфалерита, цоизита, эпидота.

Толща IV (10.41–12.70 м) перекрывает Толщу I и состоит из металлоносных глинистых осадков, сформированных около гидротермального источника. Возможно, эти осадки представляют смесь измененных теплых гемипелагических осадков с металлоносными образованиями, и сформировались в результате взаимодействия гидротермального флюида “черного курильщика” с морской водой. Нижний контакт Толщи III с Толщей I резкий.

Сульфидная Толща IV (10.41–12.70 м) находится внутри Толщи I.

В данной статье для решения задачи 2 были изучены Толщи I, II, III.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье приняты условные границы интенсивности изменения (увеличение или уменьшение) содержания химических элементов в гидротермально измененных осадках и в измененном растворе по сравнению с их содержаниями в неизмененных фоновых осадках и в растворе гидротермального источника: слабая (меньше, чем в 2 раза), средняя (в 2–4 раза), сильная (больше чем в 4 раза).

Измененный состав раствора, прошедший через осадочный покров

Для определения возможного изменения состава раствора, прошедшего через осадочный покров, были использованы результаты изучения состава гидротермального источника на 21° с.ш. ВТП [Von Damm et al., 1985; Гурвич, 1998] и гидротермального источника, расположенного в 20 м от скв. ODP 858В на гидротермальном поле “Dead Dog” в Срединной Долине хребта Хуан де Фука [Butterfield et al., 1994], а также состава источника на гидротермальном поле ASHES на хребте Хуан де Фука [Rona, Trivett, 1992] (табл. 1).

В гидротермальном источнике на гидротермальном поле “Dead Dog”, который расположен в 20 м от скв. ODP 858В, после того как раствор прошел через осадочный покров мощностью 250–300 м, произошло в разной степени изменение концентраций химических элементов по сравнению с их содержанием в гидротермальном источнике на 21° с.ш. ВТП, где нет осадочного чехла (табл. 2, рис. 3). В нем сильно уменьшилось содержание Fe, Mn, Cu, Zn, уменьшилась также концентрация Ba, Pb, но в меньшей степени (средней интенсивности изменения содержания химических элементов). Установлено небольшое уменьшение содержания Si, Li, а также слабое уменьшение содержания K. Раствор сильно обогатился Ca и в меньшей степени Sr (на среднем уровне интенсивности изменения содержания химических элементов). В растворе слабо увеличилось содержание Br. Без изменения в нем осталось содержание Mg, Na, Rb.

Сильных изменений в концентрациях РЗЭ в растворе не произошло. В растворе на среднем уровне интенсивности изменения содержания химических элементов увеличились содержания Gd, Dy, Er, Yb. Слабо увеличились концентрации Ce, Nd, Sm, содержание Eu слабо уменьшилось (табл. 3, рис. 4).

Изменения в осадках Толщ I, IIВ и IIД средних содержаний химических элементов, концентрации которых определялись и в гидротермальных источниках

К этим химическим элементам относятся Si, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Br, Li, Cu, Zn, Rb, Sr, Ba, Pb, РЗЭ (см. рис. 3, 4).

В осадках верхней части Толщи I, расположенных в интервале 1.97–10.41 м в скв. ODP 858В (см. рис. 2), в целом средние содержания химических элементов изменены слабо. Слабо

Таблица 1. Средний состав гидротермальных источников, расположенных рядом со скважиной 858В, хребет Хуан де Фука, гидротермальное поле “Dead Dog” (1) и на 21° с.ш. Восточно-Тихоокеанского поднятия (2)

Гидротермальные источники	(1) Температура 276°С	(2) Температура 273–355°С
Элемент		
Br	86 мг/кг	69 мг/кг
B	19 мг/кг	5.6 мг/кг
Li	3.85 мг/кг	6.9 мг/кг
Rb	2.7 мг/кг	2.5 мг/кг
Sr	23 мг/кг	7.3 мг/кг
Ba	2.1 мг/кг	7.9 мг/кг
Cu	0.06 мг/кг	1.45 мг/кг
Zn	0.08 мг/кг	5.3 мг/кг
Mn	3.5 мг/кг	51 мг/кг
Fe	0.84 мг/кг	88 мг/кг
Si	284 мг/кг	510 мг/кг
Na	9 г/кг	10.5 г/кг
K	0.73 г/кг	0.95 г/кг
Mg	0 г/кг	0 г/кг
Ca	3,2 г/кг	0.69 г/кг
Pb	23 мкг/кг	56 мкг/кг
La		207 нг/кг
Ce	*621 нг/кг	354 нг/кг
Nd	*314 нг/кг	220 нг/кг
Sm	*65 нг/кг	47 нг/кг
Eu	*213 нг/кг	395 нг/кг
Gd	*73 нг/кг	36 нг/кг
Dy	*46 нг/кг	25 нг/кг
Er	*21 нг/кг	8.6 нг/кг
Yb	*16 нг/кг	5.8 нг/кг
Lu		0.88 нг/кг

Примечание. * – Гидротермальный источник с температурой 283–328°С, хребет Хуан де Фука (ASHES).

увеличилась в них концентрация Mg, Ca, Cu, Pb и слабо уменьшилось содержание Fe, Na, Br, Li, Sr (см. рис. 3). Без изменения остались концентрации Si, Mn, K, Zn, Rb, Ba (см. рис. 3). Концентрации РЗЭ остались без изменения (см. рис. 4).

Таким образом, в осадках верхней части Толщи I появились только начальные признаки перераспределения химических элементов в системе взаимодействия вода–порода, которые выражены в слабом увеличении в них средних содержаний Mg, Ca, Cu, Pb, Eu и слабом уменьшении средних содержаний Fe, Na, Br, Li, Sr.

Таблица 2. Средние содержания макроэлементов и микроэлементов в гидротермальных источниках и в осадках из скважин 858В и 855А, С, D, Срединная Долина, хребет Хуан де Фука

Образец	Скважина	Толща	г/кг										мг/кг																	
			Si	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Br	Li	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Pb	Si	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Br	Li	Cu	Zn	Rb	Sr
Гидротермальные источники рядом со скв. 858В, хребет Хуан де Фука																														
284			0.84	3.5	0	3.2	9	0.73	86	3.85	0.06	0.08	2.7	23	2.1	23														
Репер: Гидротермальные источники на 21° с.ш. ВТП																														
510			88	51	0	0.69	10.5	0.95	69	6.9	1.45	5.3	2.5	7.3	7.9	56														
Si			Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Br	Li	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Pb														
%																														
мкг/г																														
2182	858В	верхняя часть I	25.51	4.78	0.08	3.88	2.71	2.05	2.10	39.0	144	141	54.9	176	668	19.6														
ZT-46A			21.60	3.47	0.09	4.89	5.41	1.94	1.59	20.5	36.2	92.8	62.9	149	552	10.6														
Среднее содержание			23.56	4.12	0.09	4.39	4.06	2.00	1.85	29.8	90.1	117	58.9	162	610	15.1														
Реперы:																														
2859	855А	I	24.22	6.05	0.11	2.55	2.96	3.00	1.98	52.3	65.7	140	52.7	297	735	12.8														
2862	855С	I	26.82	5.37	0.09	2.43	2.56	2.91	1.60	24.9	49.4	94.4	52.6	283	538	9.1														
Среднее содержание			25.52	5.71	0.10	2.49	2.76	2.96	1.79	38.6	57.6	117	52.7	290	636	11.0														
2951	858В		29.46	4.68	0.50	2.81	0.50	1.97	0.95	8.0	50.8	115	62.5	130	1071	17.0														
2952		верхняя часть I	31.08	4.34	0.05	2.96	0.73	1.60	1.12	9.0	101.3	128	47.4	78	246	19.2														
2184			28.16	4.46	0.07	4.49	0.82	2.32	1.50	34.0	50.6	280	55.6	80	296	10.0														
Среднее содержание			29.57	4.49	0.21	3.42	0.68	1.96	1.19	17.0	67.6	174	55.20	96	537	15.4														
Реперы:																														
2859	855А	I	24.22	6.05	0.11	2.55	2.96	3.00	1.98	52.3	65.7	140	52.7	297	735	12.8														
2868	855D	I	25.94	5.36	0.09	2.99	2.65	2.42	1.97	19.1	45.1	114	68.3	264	521	12.0														
Среднее содержание			25.08	5.70	0.10	2.77	2.80	2.71	1.98	35.7	55.4	127	60.5	281	628	12.4														
2185	858В		20.28	3.79	0.16	16.71	0.94	1.01	0.07	30.0	4.6	73.6	2.5	33	12	2.6														
2186			19.25	3.58	0.17	18.79	0.96	0.82	0.07	37.0	7.9	52.7	1.7	31	29	5.0														
Среднее содержание		IIВ	19.77	3.68	0.16	17.75	0.95	0.9	0.07	33.5	6.2	63.2	2.1	32	20	3.8														
Реперы:																														
2864	855С		26.77	5.30	0.08	2.50	2.43	2.51	1.83	19.1	46.4	104	42.6	225	420	10.1														
2868	855D		25.94	5.36	0.09	2.99	2.65	2.42	1.97	19.1	45.1	114	68.3	264	521	12.0														
Среднее содержание			26.36	5.33	0.09	2.74	2.54	2.45	1.9	19.1	45.8	109	55.4	245	470	11														
2955	858В	IID	34.61	3.44	0.05	6.00	0.17	0.19	0.05	6.1	2.4	47.5	1.3	6.7	20.8	0.43														
Реперы:																														
2863	855С	I	26.85	4.82	0.09	2.20	3.19	3.04	1.62	27.7	42.8	103	52.1	327	625	10.3														
2866	855D	I	27.04	5.26	0.07	2.44	2.54	2.69	1.61	17.6	39.9	105	39.7	244	418	11.1														
Среднее содержание			26.94	5.04	0.08	2.32	2.86	2.86	1.61	22.7	41.4	104	45.9	286	522	10.7														

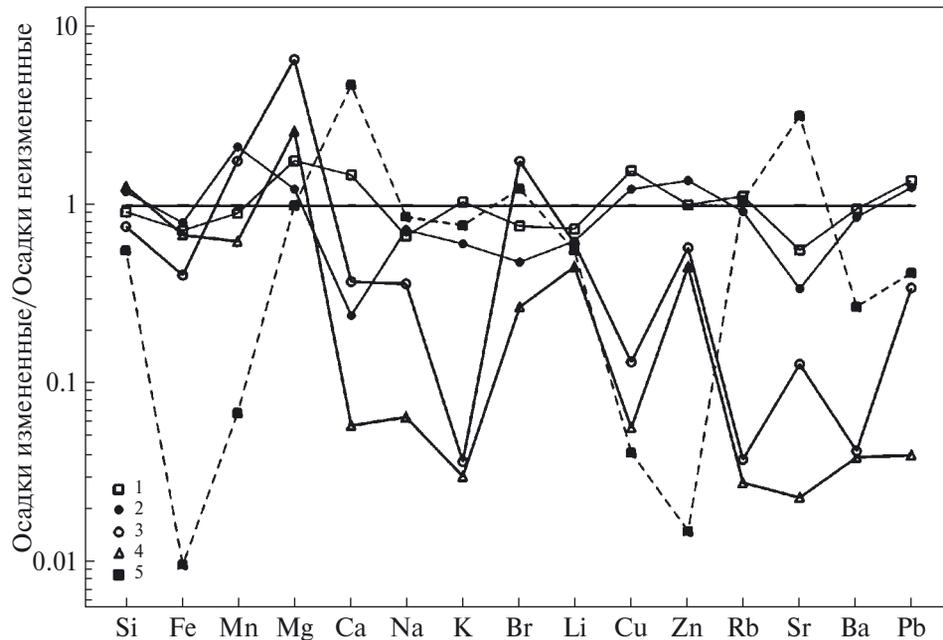


Рис. 3. Спайдерграммы. Средние содержания петрогенных элементов и микроэлементов в гидротермально измененных осадках из скважины 858В, нормированные по среднему составу неизмененных осадков из скважин 855А, С, D, и средний состав гидротермального источника, расположенного рядом со скважиной 858В, нормированного по среднему составу гидротермальных источников на 21° с.ш. ВТП.

1–4 – осадки из скважины 858В: 1 – Толща I (верхняя часть), 2 – Толща I (нижняя часть), 3 – Толща IIВ, 4 – Толща IIД; 5 – гидротермальный источник.

В осадках нижней части Толщи I, в интервале 12.70–25.31 м, изменение средних содержаний химических элементов проявлено немного лучше, чем в осадках верхней части Толщи I, но для большинства элементов осталось также слабым.

В них слабо увеличилась концентрация Si, Mn, Mg, Cu, Zn, Pb и слабо уменьшилось содержание Fe, Na, K, Br, Li, без изменения осталось меньшее количество элементов, только Rb и Ba (см. рис. 3, 4). На уровне средней интенсивности изменения содержания химических элементов уменьшилась концентрация Ca и Sr (см. рис. 3).

Концентрации РЗЭ слабо сократились, кроме содержания Eu, которое уменьшилось на среднем уровне интенсивности изменения химических элементов (см. рис. 4).

В осадках Толщи IIВ, в интервале 25.31–31.83 м, сильно увеличилось содержание Mg и сильно уменьшилось содержание K, Cu, Rb, Sr, Ba, на уровне средней интенсивности изменения содержания химических элементов в них сократилось содержание Ca, Na, Pb (см. рис. 3).

В этих осадках слабо увеличилось содержание Mn, Br и слабо уменьшилась концентрация Si, Li, Zn. Не осталось неподвижных элементов

в осадках Толщи IIВ среди рассмотренных макроэлементов и микроэлементов (см. рис. 3).

Концентрации РЗЭ остались без изменения, кроме Eu, содержание которого сильно уменьшилось (см. рис. 4).

В осадках Толщи IIД, в интервале 25.31–31.83 м произошло еще более сильное изменение химического состава, которое в основном проявилось в уменьшении концентраций химических элементов.

Сильно уменьшилось содержание Ca, Na, K, Cu, Rb, Sr, Ba, Pb. Следует отметить, что в осадках Толщи IIД количество элементов, концентрация которых сильно сократилась, заметно больше, чем в осадках Толщи IIВ. В осадках Толщ IIД и IIВ одинаково сильно уменьшилось содержание только K, Cu, Rb, Sr, Ba (см. рис. 3). В осадках Толщи IIД в меньшей степени (на уровне средней интенсивности изменения содержания химических элементов) произошло уменьшение содержания Br (см. рис. 3).

Содержание Fe, Mn, Li, Zn слабо уменьшилось, неподвижных элементов, как и в осадках Толщи IIВ, не осталось (см. рис. 3).

Таблица 3. Средние содержания редкоземельных элементов в гидротермальных источниках и в осадках из скважин 858В и 855А, С, D, океанический хребт Хуан де Фука

Элемент, нг/кг		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Гидротермальные источники хребт Хуан де Фука (ASHES)															
Репер: Гидротермальные источники на 21° с.ш. ВТП															
Элемент, мкг/г		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Образец	Скважина	Толща													
2182	858В	—	21.50	46.20	5.00	20.20	4.30	1.00	0.60	3.50	0.70	2.10	0.30	2.10	0.33
ZT-46A		Верхняя часть	19.20	37.20	4.40	18.40	4.10	1.40	0.64	3.90	0.84	2.10	0.31	1.90	0.29
Среднее содержание			20.40	41.70	4.70	19.30	4.20	2.20	0.62	3.70	0.77	2.10	0.30	2.00	0.31
Реперы для 2182, ZT-46A															
2859	855A	I	15.30	30.90	3.80	15.70	3.60	0.90	0.60	3.20	0.70	1.90	0.30	1.90	0.28
2862	855C	I	16.87	37.51	4.60	19.51	4.56	1.25	0.73	4.36	0.90	2.76	0.38	2.53	0.40
Среднее содержание			16.10	34.20	4.20	17.60	4.10	1.05	0.66	3.80	0.80	2.40	0.35	2.20	0.34
2951	858В	Верхняя часть	15.00	30.90	3.60	13.00	2.50	0.40	0.30	1.70	0.40	1.10	0.20	1.20	0.18
2952		—	10.70	21.70	2.60	9.80	2.30	0.37	0.32	1.90	0.41	1.10	0.18	1.20	0.19
2184		Нижняя часть	9.50	23.90	2.80	11.40	2.70	0.30	0.40	2.40	0.50	1.60	0.20	1.60	0.25
Среднее содержание			11.70	25.50	3.00	11.40	2.50	0.37	0.34	2.00	0.44	1.27	0.20	1.33	0.21
Реперы для 2951, 2952, 2184															
2859	855A	I	15.30	30.90	3.80	15.70	3.60	0.90	0.60	3.20	0.70	1.90	0.30	1.90	0.28
2868	855D	I	18.10	37.60	4.60	18.30	4.10	1.00	0.60	3.60	0.70	2.20	0.30	2.10	0.32
Среднее содержание			16.70	34.25	4.40	17.00	3.80	1.00	0.60	3.40	0.70	2.00	0.30	2.00	0.30
2185	858В	IIВ	15.90	42.40	4.90	19.60	4.00	0.08	0.49	2.70	0.55	1.50	0.23	1.50	0.22
2186			24.60	54.30	6.10	23.30	4.50	0.10	0.60	3.40	0.70	2.10	0.30	2.00	0.28
Среднее содержание			20.20	48.40	5.50	21.40	4.20	0.10	0.54	3.00	0.62	1.80	0.20	1.80	0.25
Реперы для 2185, 2186															
2864	855C	I	17.00	34.90	4.30	18.10	4.10	1.00	0.60	3.60	0.80	2.20	0.30	2.20	0.34
2868	855D	I	18.10	37.60	4.60	18.30	4.10	1.00	0.60	3.60	0.70	2.20	0.30	2.10	0.32
Среднее содержание			17.60	36.20	4.40	18.20	4.10	1.00	0.60	3.60	0.80	2.20	0.30	2.20	0.33
2955	858В	IIIД	3.10	11.60	1.80	8.00	2.00	0.06	0.29	1.80	0.37	0.98	0.15	0.89	0.13
Реперы для 2955															
2863	855C	I	17.10	34.20	4.30	17.60	3.90	1.00	0.60	3.30	0.70	2.10	0.30	2.00	0.29
2866	855D	I	16.00	34.60	4.20	17.40	3.90	1.00	0.60	3.60	0.70	2.20	0.30	2.10	0.32
Среднее содержание			16.60	34.40	4.20	17.50	3.90	1.00	0.60	3.40	0.70	2.20	0.30	2.00	0.30

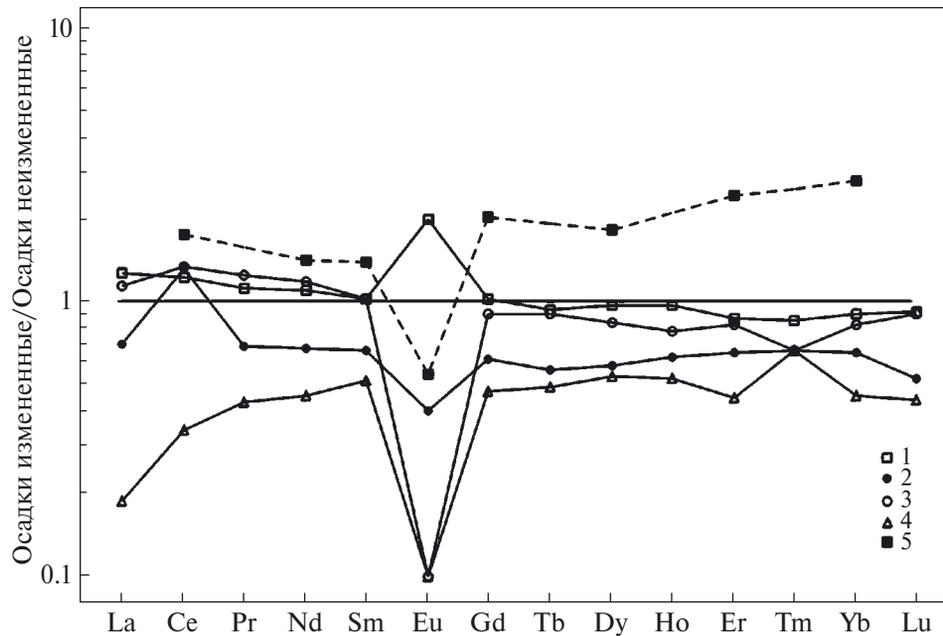


Рис. 4. Спайдерграммы. Средние содержания редкоземельных элементов в гидротермально измененных осадках из скважины 858В, нормированные по среднему составу неизмененных осадков из скважин 855А, С, D, и средний состав гидротермального источника, расположенного рядом со скважиной 858В, нормированный по среднему составу гидротермальных источников на 21° с.ш. ВТП.
1–4 – осадки из скважины 858В: 1 – Толща I (верхняя часть), 2 – Толща I (нижняя часть), 3 – Толща IIВ, 4 – Толща IIД; 5 – гидротермальный источник.

Увеличение содержания проявилось только для Mg (на уровне средней интенсивности изменения содержания химических элементов) и слабо увеличилось содержание Si (см. рис. 3).

Концентрации части легких РЗЭ уменьшились на уровне средней интенсивности изменения содержания химических элементов, содержание Eu сильно уменьшилось, как и в осадках Толщи IIВ (см. рис. 4).

Таким образом, основные изменения содержания химических элементов произошли в осадках Толщ IIВ и IIД.

Изменения в осадках Толщ I, IIВ и IIД средних содержаний химических элементов, концентрации которых не определялись в гидротермальных источниках

Спайдерграммы изменения средних содержаний петрогенных элементов и микроэлементов в осадках из Толщи I (верхняя часть), Толщи I (нижняя часть), Толщи IIВ, Толщи IIД из скв. ODP 858В сделаны по данным, приведенным в табл. 4, и показаны на рис. 5.

В осадках верхней части Толщи I концентрации всех изученных химических элементов или слабо увеличились (P, S, F, I, Cs, Ta, W, Bi, U), или слабо уменьшились (Ti, Al, Sc, V, Cr, Co, Ni, Ga, As, Ag, Cd, Sb), содержания остальных элементов (Be, Y, Zr, Nb, Hf, Tl, Th) остались без изменения (см. рис. 5).

В осадках нижней части Толщи I на уровне средней интенсивности изменения содержаний химических элементов увеличилось содержание S, As, Sb, U. Содержание остальных элементов или слабое, или осталось без изменения (см. рис. 5). Без изменения остались концентрации F, Zr, Nb, Hf, Ta, Tl, Bi, Th.

В осадках Толщи IIВ сильно уменьшилось содержание P, Cd, Cs, на уровне средней интенсивности изменения содержаний химических элементов в них уменьшилось содержание Tl. Одновременно в них сильно увеличилось содержание I и Mo (см. рис. 5).

Изменение содержания остальных элементов или слабое, или осталось без изменения (см. рис. 5). Без изменения остались концентрации Cr, Ni, Ga, Zr, Nb, Ag, Hf.

Таблица 4. Средние содержания макроэлементов и микроэлементов в осадках Толщи I из скв. 858В, содержание которых не изучено в гидротермальных источниках

Образец	Скважина	Толща	%										мкг/г									
			Ti	Al	P	S	F	I	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Ga	As	Y	Zr	Nb			
2182 ZT-46A	858В	I	0.52	7.60	0.12	0.56	0.06	15.0	1.6	14.6	128	73.7	15.5	34.6	17.3	1.2	22.7	114	10.1			
			0.39	7.06	0.08	0.31	0.04	2.5	1.2	11.0	117	59.0	17.0	40.6	13.6	4.1	23.8	85	7.1			
Среднее содержание			0.46	7.33	0.10	0.44	0.05	8.8	1.4	12.8	122	66.4	16.2	15.4	2.6	23.2	100	8.6				
Реперы для 2182, ZT-46A																						
2859	855A	I	0.51	8.51	0.07	0.33	0.03	8.6	1.4	16.6	171	78.0	22.8	58.8	19.1	6.9	21.0	83.5	7.4			
2862	855С	I	0.55	8.33	0.07	0.14	0.02	2.5	1.2	22.5	163	94.9	22.1	52.8	17.6	4.0	25.6	113	9.0			
Среднее содержание			0.53	8.42	0.07	0.24	0.03	5.60	1.3	19.6	167	86.4	22.4	55.4	18.3	5.4	23.3	98.2	8.2			
2951	858В	I	0.43	7.49	0.05	1.10	0.02	2.5	1.3	14.4	118	68.7	7.6	27.7	14.1	20.0	9.5	91	8.9			
2952		I	0.34	6.34	0.06	0.88	0.02	2.5	1.0	10.3	111	60.6	7.1	28.6	13.5	25.3	10.8	87	7.8			
2184		I	0.50	7.34	0.08	0.48	0.04	2.5	1.1	18.0	146	79.4	15.3	45.1	14.1	11.2	14.1	92	8.0			
Среднее содержание			0.43	7.06	0.06	0.82	0.03	2.5	1.1	14.2	125	69.6	10.0	33.8	13.9	18.8	11.5	90	8.2			
Реперы для 2951, 2952, 2184																						
2859	855A	I	0.51	8.51	0.07	0.33	0.03	8.6	1.4	16.6	171	78.0	22.8	58.8	19.1	6.9	21.0	83.5	7.4			
2868	855D	I	0.53	8.39	0.08	0.13	0.03	2.5	1.4	18.4	140	77.9	19.3	45.9	19.8	6.6	22.9	104	8.8			
Среднее содержание			0.52	8.45	0.07	0.23	0.03	5.60	1.4	17.5	156	78.0	21.0	52.4	19.4	6.8	22.0	92.0	8.1			
2185	858В	I	0.23	5.60	0.01	0.16	0.01	2.5	0.7	15.9	121	67.2	12.8	39.5	20.5	4.3	13.6	121	11.8			
2186		I	0.38	7.16	0.01	0.30	0.01	30.0	1.0	15.9	131	88.7	12.7	45.8	16.9	4.1	20.8	114	12.6			
Среднее содержание		III	0.30	6.38	0.01	0.23	0.01	16.3	0.9	15.9	126	78.0	12.8	42.6	18.7	4.2	17.2	118	12.2			
Реперы для 2185, 2868																						
2864	855С	I	0.56	8.51	0.08	0.17	0.02	2.5	1.5	17.1	169	76.6	17.8	43.4	18.7	5.3	23.5	117	9.2			
2868	855D	I	0.53	8.39	0.08	0.13	0.03	2.5	1.4	18.4	140	77.9	19.3	45.9	19.8	6.6	22.9	104	8.8			
Среднее содержание		III	0.55	8.45	0.08	0.15	0.02	2.5	1.4	17.8	154	77.2	18.6	44.6	19.2	6.0	23.2	110	9.0			
2955	858В	III	0.21	3.83	0.01	0.01	0.02	2.5	0.33	5.6	59.9	32.4	6.5	33.3	6.2	1.3	10.0	66	4.6			
Реперы для 2955																						
2863	855С	I	0.51	8.16	0.08	0.34	0.03	2.5	1.3	16.0	149	64.7	17.3	47.8	17.7	5.4	21.6	101	7.9			
2866	855D	I	0.53	8.28	0.08	0.44	0.02	2.5	1.2	17.5	151	70.1	16.6	37.3	17.1	13.3	22.8	106	7.8			
Среднее содержание			0.52	8.20	0.08	0.39	0.02	2.5	1.2	16.8	150	67.4	17.0	42.6	17.4	9.4	22.2	103	7.8			

Таблица 4. Окончание

Образец	Скважина	Толща	Mo	Ag	Cd	Sb	Cs	Hf	Ta	W	Tl	Bi	Th	U
2182	858B	I	1.3	0.19	0.07	0.51	4.66	3.1	0.7	1.04	0.39	0.39	6.7	2.3
ZT-46A			2.7	0.09	0.17	0.48	3.98	2.2	0.5	0.90	0.34	0.15	4.0	2.6
Среднее содержание			2.0	0.14	0.12	0.50	4.30	2.7	0.6	0.96	0.36	0.27	5.3	2.4
Реперы для 2182, ZT-46A														
2859	855A	I	1.7	0.23	0.34	0.78	3.97	2.2	0.50	0.75	0.39	0.16	4.8	1.9
2862	855C	I	1.0	0.11	0.12	0.68	2.80	3.3	0.57	0.79	0.37	0.14	4.9	1.7
Среднее содержание			1.3	0.17	0.23	0.73	3.40	2.8	0.53	0.77	0.38	0.15	4.8	1.8
2951	858B	I	2.4	0.5	0.06	2.18	2.28	2.4	0.57	0.98	0.40	0.23	6.6	3.4
2952			2.8	0.6	0.22	2.31	1.80	2.1	0.51	1.01	0.28	0.17	5.0	8.2
2184			1.7	0.2	0.81	1.28	1.58	2.5	0.50	0.90	0.34	0.14	5.1	4.7
Среднее содержание			2.3	0.4	0.36	1.92	1.90	2.3	0.53	0.96	0.34	0.18	5.6	5.4
Реперы для 2951, 2952, 2184														
2859	855A	I	1.7	0.23	0.34	0.78	3.97	2.2	0.50	0.75	0.39	0.16	4.8	1.9
2868	855D	I	1.2	0.12	0.16	0.48	3.60	2.8	0.64	0.77	0.35	0.17	5.6	2.1
Среднее содержание			1.45	0.18	0.25	0.63	3.78	2.5	0.56	0.76	0.37	0.16	5.2	2.0
2185	858B		19.6	0.04	<ПО	<ПО	0.26	2.9	0.77	0.90	0.04	0.11	4.9	9.2
2186		III	40.4	0.3	0.02	0.61	0.12	3.0	0.91	0.50	0.14	0.35	9.4	6.3
Среднее содержание			30.0	0.17	0.01	0.30	0.20	3.0	0.84	0.70	0.09	0.23	7.2	7.8
Реперы для 2185, 2868														
2864	855C	I	0.89	0.10	0.18	0.50	17.10	3.1	0.64	0.80	0.31	0.16	5.0	1.5
2868	855D	I	1.72	0.23	0.34	0.48	18.40	2.8	0.64	0.77	0.35	0.17	5.6	2.1
Среднее содержание			0.87	0.16	0.26	0.49	17.75	3.0	0.64	0.78	0.33	0.16	5.3	1.8
2955	858B	III	1.5	<ПО	<ПО	<ПО	0.08	1.6	0.30	0.35	0.01	0.03	2.5	2.0
Реперы для 2955														
2863	855C	I	1.9	0.21	0.30	0.76	3.00	2.7	0.58	0.72	0.36	0.14	4.7	2.0
2866	855D	I	2.0	0.10	0.13	0.62	2.40	2.9	0.57	0.67	0.28	0.11	4.4	1.4
Среднее содержание			1.9	0.15	0.22	0.69	2.7	2.8	0.57	0.7	0.32	0.12	4.6	1.7

Примечание. <ПО – ниже предела определения.

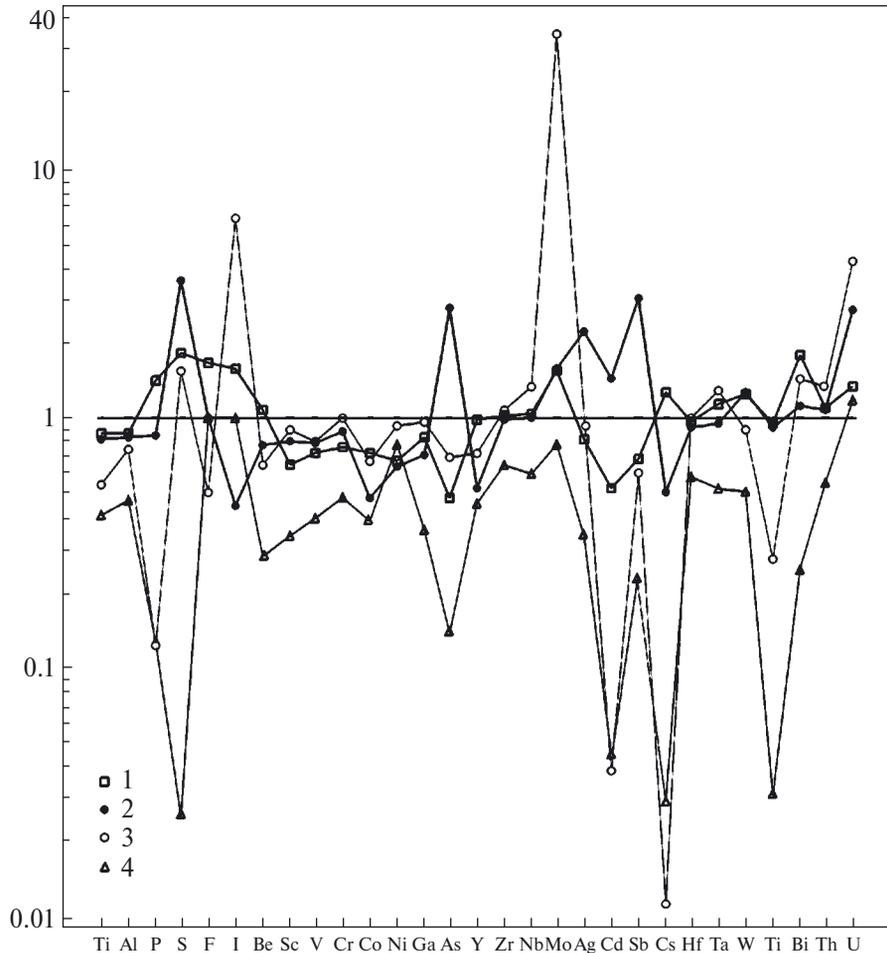


Рис. 5. Спайдерграммы. Средние содержания петрогенных элементов и микроэлементов в гидротермально измененных осадках из скважины 858В, нормированные по среднему составу неизмененных осадков из скважин 855А, С, D. 1–4 – осадки из скважины 858В: 1 – Толща I (верхняя часть), 2 – Толща I (нижняя часть), 3 – Толща IIВ, 4 – Толща IIД.

В осадках Толщи IIД сильно уменьшились концентрации S, As, Cd, Cs, Ti, на уровне средней интенсивности изменения содержаний химических элементов в них уменьшилось содержание Ti, Be, Sc, V, Co, Ga, Ag, Sb, Bi (см. рис. 5). Слабо уменьшились концентрации Al, Ni, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W, Th, U. Без изменения остались концентрации F, I, U, то есть почти не осталось неподвижных элементов.

Обращает на себя внимание, что в этих осадках нет химических элементов, концентрация которых возросла, кроме Mg (см. рис. 5).

Таким образом, основные изменения содержания рассмотренных химических элементов произошли в осадках Толщ IIВ и IIД.

Влияние сильной и средней интенсивности изменения содержаний химических элементов в осадках Толщ I, IIВ и IIД на изменение состава раствора при его миграции в верхней части разреза осадочного покрова

В определении влияния изменения содержаний химических элементов в гидротермально измененных осадках Толщ I, IIВ и IIД на заключительном этапе трансформации состава раствора при его прохождении в верхней части разреза осадочного покрова, пробуренного скважиной ODP 858В на 38.6 м, был использован следующий подход. В системе взаимодействия раствор–осадки при уменьшении/увеличении содержания химических элементов в гидротермально измененных осадках соответственно зеркально

Таблица 5. Сильной и средней интенсивности изменение содержания химических элементов в растворе при его взаимодействии с осадками из скважины ODP 858B, гидротермальное поле “Dead Dog”, северный сегмент Срединной Долины, хребет Хуан де Фука

Толща, интервал в скважине	Сильное увеличение концентрации химического элемента	Средней интенсивности увеличение концентрации химического элемента	Сильное уменьшение концентрации химического элемента	Средней интенсивности уменьшение концентрации химического элемента	Температура
I (верхняя часть) 1.97–10.41 м					~17°C
I (нижняя часть) 12.70–25.31 м	Ni	Ca Sr Eu		S As, Sb, U	не менее 112°C
ПВ 25.31–31.83 м	К Cu, Rb, Sr, Ba, P, Cd, Cs, Eu	Ca, Na Pb, Tl	Mg I, Mo		200–270°C
ПД 31.83–38.60 м	Ca, Na, K, S Cu, Rb, Sr, Ba, Pb, As, Cd, Cs, Tl, Eu	Ti, Br Be, Sc, V, Co, Ga, Ag, Sb, Bi		Mg	270–350°C

происходит увеличение/уменьшение этих химических элементов в растворе.

Результаты определения изменения химического состава раствора при его взаимодействии с осадками Толщ I, ПВ и ПД представлены в табл. 5.

Химические элементы, содержания которых в осадках Толщ I, ПВ и ПД изменились слабо, соответственно заметно не повлияли на изменение состава раствора, мигрирующего через верхнюю часть осадочного покрова.

Наибольшее влияние на состав раствора произошло при его взаимодействии с осадками Толщ ПД и ПВ, которое выражено в его обогащении большим количеством химических элементов, кроме Mg, которым раствор соответственно обеднел. Раствор при взаимодействии с осадками Толщи ПВ обеднел еще и I и Mo (см. табл. 5).

При прохождении раствора через осадки верхней части Толщи I в нем содержание химических элементов не изменилось (см. табл. 5). При взаимодействии раствора с осадками нижней части Толщи I в растворе увеличилось небольшое количество элементов (Ca, Sr, Ni, Eu) и в нем одновременно сократилась концентрация S, As, Sb, U (см. табл. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температурные условия изменения раствора при его прохождении через осадочный покров

Преобразование вещественного состава осадков из скв. ODP 858B произошло в условиях высокого температурного градиента 10°C/м, который был определен по изотопному составу кислорода в аутигенных карбонатах [Buatier et al., 1994; Frù-Green et al., 1994] с учетом замеренной в скважине температуры 197°C на глубине 19.5 м [Davis et al., 1992], а также с данными определения температуры по изотопам кислорода для аутигенных глинистых минералов и кварца, которые дают температуру приблизительно 265°C на глубине 32 м в скв. ODP 858B, а максимальная температура в основании скважины была оценена примерно в 330°C [Frù-Green et al., 1994; Peter et al., 1994].

Результаты изучения методом моделирования дифракционных картин глинистых минералов, преобладающих в изученных алевроглинистых гемипелагических плейстоценовых осадках из скв. ODP 858B, позволили получить дополнительные сведения о температуре [Сахаров, Курносов, 2022]. В верхней части Толщи I (1.97–10.41 м) сохранились без изменения терригенные глинистые минералы, состоящие из иллита, смешанослойного смектит-иллита и хлорита. Эта ассоциация терригенных глинистых

минералов соответствует температуре $\sim 17^\circ\text{C}$, которая рассчитана для глубины 7.2 м в скважине. Вниз по разрезу, в условиях повышения температуры в верхней половине нижней части Толщи I, в интервале от 12.70 м примерно до 17 м терригенный смектит-иллит преобразовался в хлорит-смектит, а терригенные иллит и хлорит остались неизменными. Рассчитанная по температурному градиенту температура этого перехода, может достигать 112°C , которой соответствуют произошедшие начальные изменения ассоциации терригенных глинистых минералов. Ниже, из интервала 18–24 м, керн не был поднят, соответственно по осадкам нижней половины нижней части Толщи I нет сведений. В осадках Толщи IIВ (25.31–31.83 м) все терригенные глинистые минералы преобразовались в корренсит, а в осадках, расположенных около нижней границы Толщи IIВ, кроме корренсита сформировался хлорит. Температурный интервал формирования глинистых минералов в осадках Толщи IIВ, оцененный по температурному градиенту, составляет $200\text{--}270^\circ\text{C}$. В осадках Толщи IIД (31.83–37.40 м) новообразованные глинистые минералы состоят из хлорита, корренсита и тальк-смектита, а в осадках в самом низу скважины, на глубине 38.4 м установлен только хлорит. На этой глубине температура была оценена примерно в 330°C [Frü-Green et al., 1994; Peter et al., 1994]. Эта температура формирования хлорита близка температуре его образования от 270°C и выше, которая получена при изучении керна из скважин, пробуренных в спрединговом рифте на гидротермальном поле Рейкьянес в Исландии [Kristmannottir, 1976].

В валовых образцах осадков Толщи IIВ встречен ангидрит, температура образования которого по экспериментальным данным $200\text{--}300^\circ\text{C}$ [Hajash, Archer, 1980; Seyfried, Bischoff, 1981]. При изучении валового образца осадков на глубине 32.83 м (Толща IIД) рентгеновским методом и в петрографическом шлифе установлена хлорит–кварцевая ассоциация [Davis et al., 1992; Buatier et al., 1994; Kurnosov et al., 1994]. Образование хлорит–кварцевой ассоциации происходит при температуре $350\text{--}450^\circ\text{C}$ [Маракушев, 1968].

Обращает на себя внимание, что температура в верхней части разреза осадков, находящихся рядом с центральным каналом подъема с последующей разгрузкой на дне гидротермального раствора, в интервале от 38.6 м до 1.97 м быстро уменьшается несмотря на то, что осадки из этого интервала глубин находятся на одинаковом расстоянии от него. Сильное уменьшение

температуры наблюдается примерно от глубины 15–25 м и выше. Возможно, этот эффект связан с поступлением в осадки верхней части осадочного разреза холодной морской воды.

Ниже глубины 38.6 м, до которой пробурена скв. ODP 858В, в осадочном покрове мощностью 250–300 м, температура может составлять не менее $400\text{--}450^\circ\text{C}$. В связи с тем, что наиболее сильный обмен химическими элементами произошел в системе взаимодействия раствора с осадками Толщи IIД при температуре $270\text{--}330^\circ\text{C}$, который выражен в обеднении осадков большим количеством химических элементов и, соответственно, в обогащении ими раствора (см. табл. 5), можно предположить, что в осадочном покрове, ниже глубины 38.6 м, этот процесс усиливается в условиях более высокой температуры.

*Поведение химических элементов
в процессе взаимодействия раствор–осадки
и минеральный состав осадков*

При прохождении раствора в верхней части осадочного покрова, пробуренного скважиной ODP 858В на глубину 38.6 м, в осадках произошло существенное изменение содержания большого количества химических элементов только в осадках Толщ IIВ и IIД, которое, соответственно, значительно повлияло на изменение состава раствора. Выявление связи поведения различных элементов в процессе взаимодействия раствор–осадки с минеральным составом проведено для этих осадков.

Алеврито-глинистые гемипелагические осадки из скв. ODP 858В состоят преимущественно из глинистых минералов [Buatier et al., 1994; Kurnosov et al., 1994; Leybourne, Goodfellow, 1994; Сахаров, Курносов, 2022]. Соответственно с их трансформацией связано поведение ряда химических элементов в системе взаимодействия раствор–осадки. При гидротермальном метасоматизме осадков произошел переход смектита в корренсит и корренсита в хлорит [Buatier et al., 1994]. При дополнительном исследовании глинистых минералов на современном уровне их изучения с применением моделирования рентгеновских дифракционных картин установлен более детальный транзитный ряд: триоктаэдрический смектит (сапонит) \rightarrow смешанослойный смектит-хлорит \rightarrow корренсит \rightarrow смешанослойный хлорит-смектит \rightarrow тальк \rightarrow хлорит [Сахаров, Курносов, 2022].

Кроме глинистых минералов в этих осадках были изучены также неглинистые минералы [Davis et al., 1992; Buatier et al., 1994; Goodfellow, Peter, 1994; Kurnosov et al., 1994; Leybourne,

Goodfellow, 1994; Сахаров, Курносов, 2022], с растворением или формированием которых также связано поведение химических элементов.

В неизменных фоновых осадках (Толща I), кроме доминирующих терригенных глинистых минералов, состоящих из смектит-иллита, иллита и хлорита [Сахаров, Курносов, 2022], установлены кварц и полевые шпаты (от 3 до 10% каждый из них), роговая обманка от 1–2% до 3–10%, примесь (<1%) магнетита и пирита [Leybourne, Goodfellow, 1994], а также циркон, кальцит, глауконит, непрозрачные рудные минералы и фораминиферы, диатомеи, радиолярии, наннофоссилии [Davis et al., 1992]. Результаты просмотра шлифов наших образцов неизменных осадков совпадают с этими данными.

В осадках Толщи ПВ, где трансформация глинистых минералов проявилась в формировании корренсита, а в осадках Толщи ПД – в формировании хлорита произошло существенное увеличение концентрации Mg и, соответственно, его содержание сильно уменьшилось в растворе (см. рис. 3, табл. 5). Существенное уменьшение концентрации K, Na в осадках Толщ ПВ и ПД (см. рис. 3) связано с растворением терригенных полевых шпатов и соответственно с сильным увеличением содержания этих элементов в растворе (см. табл. 5). Полевые шпаты присутствуют в неизменных фоновых осадках (Толща I) и исчезают в осадках Толщ ПВ и ПД [Kurnosov et al., 1994]. Заметное уменьшение в осадках концентрации Ca связано с растворением карбонатов. Его концентрация, соответственно, заметно возрастает в растворе (см. рис. 3, табл. 5).

Увеличение в осадках концентрации Mo в осадках Толщ ПВ и ПД (см. рис. 3) связано с его поступлением в осадки из металлоносного раствора с формированием сульфида и сопровождается заметным уменьшением содержания этого элемента в растворе (см. табл. 5).

Уменьшение в осадках Толщ ПВ и ПД концентрации Rb, Sr связано с растворением карбонатов и частично с трансформацией глинистых минералов и сопровождается увеличением содержания этих элементов в растворе (см. рис. 3, табл. 5). Уменьшение в этих осадках рудных элементов скорее всего связано с трансформацией глинистых минералов, которые содержат эти элементы в сорбированном виде и, возможно, с растворением карбонатов, которые могут содержать эти элементы.

Сильное уменьшение содержания в осадках Толщ ПВ и ПД Eu относится к растворению

полевых шпатов и, соответственно, сопровождается увеличением его концентрации в растворе (см. рис. 4, табл. 5). Полевые шпаты присутствуют в неизменных осадках и исчезают в осадках Толщ ПВ и ПД [Kurnosov et al., 1994]. Кроме того, обогащение раствора Eu возможно связано и с растворением карбонатов, содержащих РЗЭ.

Уменьшение в осадках Толщи ПД содержания Ti связано с растворением терригенных магнетита и рутила, которые установлены ранее [Kurnosov et al., 1994; Leybourne, Goodfellow, 1994] и при просмотре шлифов, изученных нами образцов неизменных фоновых осадков из скв. ODP 855A, C, D.

В растворе, прошедшем через весь осадочный покров, произошло сильное уменьшение концентрации Fe и Mn в растворе (см. рис. 3). Это уменьшение концентрации Fe и Mn в растворе коррелирует с формированием в осадках, через которые движется раствор, прежде всего Fe-хлорита. Часть Fe и Mn могла пойти на формирование в осадках тальк-смектита, в котором Mg может частично замещаться на Fe, Mn. Кроме того, Mn, которым обедняется раствор, и соответственно обогащаются осадки, может быть израсходован на образование Mn-сульфида. Сильное обеднение раствора Cu и Zn и в меньшей степени обеднение Pb (см. рис. 3) и, соответственно, обогащение этими элементами осадков коррелирует с образованием в гидротермально измененных осадках сульфидов этих элементов и с формированием самородных металлов. Уменьшение в растворе концентрации Ba (см. рис. 3) сопровождается формированием в осадках барита.

Увеличение в растворе Ca и Sr (см. рис. 3) возможно связано с растворением карбонатов, содержащихся в осадках.

Увеличение в растворе тяжелых РЗЭ (см. рис. 4) может быть связано с трансформацией глинистых минералов и с растворением в осадках полевых шпатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В северном сегменте Срединной Долины хребта Хуан де Фука, где на гидротермальном поле “Dead Dog” рядом с гидротермальным источником с температурой 276°C пробурена скважина ODP 858В глубиной 38.6 м, изучено влияние осадков Толщ I, ПВ, ПД на трансформацию состава раствора в верхней части разреза осадочного покрова на заключительном этапе его миграции перед разгрузкой на дне.

В процессе взаимодействия раствор—осадки на изменение химического состава раствора существенно повлияли осадки Толщ ПВ и ПД при их изменении в условиях высокой температуры, от 200°С до 350°С. В результате этого взаимодействия осадки существенно обеднели большим количеством химических элементов и соответственно раствор ими обогатился.

Раствор гидротермального источника, расположенного рядом со скв. ODP 858В, при прохождении через весь осадочный покров мощностью 250–300 м сильно обеднел Fe, Mn, Cu, Zn, в меньшей степени обеднел Ba и Pb и обогатился Ca, Sr и несколькими тяжелыми РЗЭ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Г.Н. Новикову за подготовку образцов пород для химических анализов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

В данном исследовании использованы образцы пород, отобранные в кернохранилище Программы океанского бурения – ODP (Ocean Drilling Program) при Техасском университете (Texas A&M University) в г. Колледж Стейшн (College Station).

Работа выполнена в рамках государственного плана научно-исследовательских работ по теме № гос. регистрации: АААА-А19-119020490093-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блинова Е.В., Курносов В.Б.* Гидротермальные изменения осадков в южном тропе впадины Гуаймас Калифорнийского залива и трансформация состава растворов // Литология и полез. ископаемые. 2015. № 6. С. 491–509.
- Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевиц А.М., Гурвич Е.Г.* Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Научный мир, 2006. 527 с.
- Богданов Ю.А., Сагалевиц А.М.* Геологические исследования с глубоководных обитаемых аппаратов. М.: Научный мир, 2002. 304 с.
- Гурвич Е.Г.* Металлоносные осадки Мирового океана. М.: Научный мир, 1998. 340 с.
- Курносов В.Б., Блинова Е.В.* Гидротермальные изменения осадков и трансформация состава растворов во впадине Гуаймас Калифорнийского залива // ДАН. 2015. Т. 461. № 2. С. 197–200.
- Маракушев А.А.* Термодинамика метаморфической гидратации минералов. М.: Наука, 1968. 200 с.
- Сахаров Б.А., Курносов В.Б.* Особенности образования глинистых минералов в осадках из центра гидротермальной системы, скважина 858В, хребет Хуан де Фука // Литология и полез. ископаемые. 2022. № 2. С. 1–22.
- 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 / Eds M.J. Mottl, E.E. Davis, A.T. Fisher, J.F. Slack. Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1994. P. 133–154.
- Butterfield D.A., McDuff R.A., Franrlin J., Wheat C.G.* Geochemistry of hydrothermal vent fluids from Middle Valley, Juan de Fuca Ridge / Eds M.J. Mottl, E.E. Davis, A.T. Fisher, J.F. Slack. Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1994. P. 395–410.
- Currey J. R., Moore D. G., Aguayo J. E. et al.* Init. Repts. DSDP. V. 64. Pt. 1. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1982. 507 p.
- Davis E.E., Mottl M.J., Fisher A.T. et al.* Init. Repts., 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1992. 1026 p.
- Davis E.E., Villinger H.* Tectonic and thermal structure of the Middle Valley sedimented rift, northern Juan de Fuca Ridge / Eds M.J. Mottl, E.E. Davis, A.T. Fisher, J.F. Slack. Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1994. P. 9–41.
- 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 / Eds M.J. Mottl, E.E. Davis, A.T. Fisher, J.F. Slack. Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1994. P. 291–306.
- Goodfellow W.D., Peter J.M.* Geochemistry of hydrothermally altered sediment, Middle Valley, northern Juan De Fuca Ridge / Eds M.J. Mottl, E.E. Davis, A.T. Fisher, J.F. Slack. Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1994. P. 207–289.
- Hajash A., Archer P.* Experimental seawater/basalt interaction: effects of cooling // Contrib. Mineral. Petrol. 1980. V. 75. P. 1–13.
- Kelts K.* Petrology of hydrothermally metamorphosed sediments at deep sea drilling Site 477, southern Guaymas Basin rift, Gulf of California / Init. Repts. DSDP. V. 64. Pt. 2. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1982. P. 1123–1136.
- Kristmannottir H.* Types of clay minerals in hydrothermally altered basaltic rocks, Reykjanes, Iceland // Jökull. 1976. V. 26. P. 30–39.
- Kurnosov V., Murdmaa I., Rosanova T. et al.* Mineralogy of hydrothermally altered sediments and igneous rocks at Site 856–858, Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, Leg 139 / Eds M.J. Mottl, E.E. Davis, A.T. Fisher, J.F. Slack. Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1994. P. 113–131.

Leybourne M.I., Goodfellow W.D. Mineralogy and mineral chemistry of hydrothermally altered sediment, Middle Valley, Juan de Fuca Ridge / Eds M.J. Mottl, E.E. Davis, A.T. Fisher, J.F. Slack. Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1994. P. 155–206.

Peter J.M., Goodfellow W.D., Leybourne M.I. Fluid inclusion petrography and microthermometry of the Middle Valley hydrothermal system, northern Juan de Fuca Ridge / Eds M.J. Mottl, E.E. Davis, A.T. Fisher, J.F. Slack. Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1994. P. 411–428.

Rona P.A., Trivett D.A. Discrete and diffuse heat transfer at ASHES vent field, Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge // Earth Planet. Sci. Lett. 1992. V. 109. № 1. P. 57–71.

Seyfried W.E., Bischoff J.L. Experimental seawater-basalt interaction at 300°C, 500 bars, chemical exchange, secondary mineral formation and implications for transport of heavy-metals // Geochim. Cosmochim. Acta. 1981. 45. P. 135–151.

Von Damm K.L., Edmond J.M., Grant B. et al. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21° N, East Pacific Rise // Geochim. Cosmochim. Acta. 1985. V. 49. № 11. P. 2197–2220.

CHANGE OF SOLUTION COMPOSITION DURING IT MIGRATION THROUGH THE SEDIMENTARY COVER IN THE CENTER OF THE MODERN HYDROTHERMAL SYSTEM (JUAN DE FUCA RIDGE, PACIFIC OCEAN, HOLE ODP 858B)

V. B. Kurnosov*, **Y. I. Konovalov**, **O. I. Okina**, **K. R. Galin**

*Geological Institute, Russian Academy of Sciences,
Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

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

The article presents the results of studying the change of the composition of the hydrothermal solution during its migration through the Pleistocene sediments from the Hole ODP 858B 38.6 m deep, which was drilled in the northern segment of the Middle Valley of the Juan de Fuca Ridge, in the Dead Dog hydrothermal field, in 20 m from the hydrothermal source with temperature 276°C. The influence of sediments of the Units I, IIB, IID from this hole on the change in the composition of the solution during the solution-sediment interaction has been established. The greatest influence on the composition of the solution occurred during its interaction with the sediments of the Units IIB and IID under high-temperature conditions (200–350°C), which is expressed in the enrichment of the solution with a large amount of chemical elements. A possible change in the composition of the solution is shown in the process of solution-sediment interaction during its migration through the entire sedimentary cover with a thickness of 250–300 m.

Keywords: oceanic hydrothermal system, Juan de Fuca Ridge, change of solution composition, solution-sediment interaction, deep-sea drilling, hydrothermal source.