

УДК 550.424

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОСАДКОВ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ В ЦЕНТРЕ СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В СРЕДИННОЙ ДОЛИНЕ ОКЕАНИЧЕСКОГО ХРЕБТА ХУАН ДЕ ФУКА, СКВАЖИНА 858В ODP

© 2023 г. В. Б. Курносов<sup>а</sup>, \*, Ю. И. Коновалов<sup>а</sup>, К. Р. Галин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Геологический институт РАН, Пыжжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

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

Поступила в редакцию 24.06.2022 г.

После доработки 03.08.2022 г.

Принята к публикации 04.08.2022 г.

В статье приведены результаты изучения химического состава плейстоценовых осадков и его изменений в скважине 858В глубиной 38.6 м с температурным градиентом 10–11°C/м, пробуренной в Срединной Долине океанического хребта Хуан де Фука (северо-восточная часть Тихого океана) на гидротермальном поле “Dead Dog”, в 20 м от “черного курильщика” с температурой 276°C. Содержание макроэлементов в этих осадках изучено методом РФА. Впервые для этого объекта получены методом ИСП МС данные по большому набору микроэлементов. Изменение химического состава осадков произошло в процессе взаимодействия раствор–порода в условиях быстрого увеличения температуры вниз по разрезу. В Толще I, в верхней ее части (1.97–10.41 м), осадки в основном слабо изменены при температуре около 17°C. В нижней части Толщи I (12.70–25.31 м) в условиях средней температуры (112–197°C) изменения в содержании макроэлементов и микроэлементов хорошо выражены. Наиболее сильно изменен химический состав осадков Толщ IIВ и IIД (25.31–38.6 м) в температурном диапазоне от 112–197°C до 320–330°C. Изменения содержания большинства макроэлементов и микроэлементов в осадках Толщи IIВ и Толщи IIД сходные, с тем отличием, что в осадках Толщи IIД уменьшение содержания химических элементов проявлено сильнее. В них концентрации Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, Tl, Bi, кроме U, существенно более низкие, чем в фоновых осадках. В осадках Толщи IIД так же, как в осадках Толщи IIВ, содержание Ca, Na, K, P ниже фонового, а концентрация Mg, напротив, более высокая. Уменьшение содержания перечисленных химических элементов в этих осадках можно рассматривать как результат их выноса из осадков в процессе взаимодействия раствор–осадок и обогащение ими раствора, а более высокое их содержание – как привнос этих элементов в осадки из раствора и, соответственно, обеднение ими раствора. Приведены результаты изучения химического состава металлоносных осадков (Толща III, 0–1.97 м) и сульфидной Толщи IV (10.41–12.70 м), а также химического состава неизмененных фоновых осадков из скважин 855А, С, D.

*Ключевые слова:* гидротермальная система, океанический хребет Хуан де Фука, гидротермальные изменения осадков, перераспределение химических элементов, глубоководное бурение.

DOI: 10.31857/S0024497X23010032, EDN: GWRUDO

Срединно-океанические хребты расположены в центральных частях океанов на большом удалении от континентов. Осевые зоны этих хребтов не имеют осадочного покрова, и “черные курильщики” находятся непосредственно на дне, сложенном базальтами. В этом случае рудообразующие гидротермальные системы охватывают исключительно кристаллические породы, которые находятся в пространстве от магматической камеры до поверхности дна.

В отличие от них, океанические хребты, расположенные вблизи континентов, перекрыты четвертичными осадками мощностью в сотни

метров. Эти хребты получили в англоязычной литературе название “sedimented ridges”. В них, в центрах спрединга, конвективные гидротермальные системы охватывают не только кристаллический фундамент, но и осадочный покров. В результате при миграции растворов через осадочный покров, в процессе взаимодействия вода–порода, происходит изменение, как вещественного состава осадков, так и состава растворов.

Влияние осадочного покрова на изменение состава гидротермальных металлоносных растворов, мигрирующих через него и разгружающихся на дне в виде “черных курильщиков”, было пока-

зано ранее [Богданов, Сагалевич, 2002; Богданов и др., 2006]. Это влияние было 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. Эта разница отнесена к трансформации состава раствора при его миграции в осадочном покрове в процессе взаимодействия вода–порода. Авторами этого исследования было сделано допущение, которое заключалось в том, что на различных участках ВТП, не имеющих осадочного чехла, состав гидротермальных источников близок, и соответственно растворы, поступающие из магматического фундамента в перекрывающие осадки на 27° с.ш. ВТП (Калифорнийский залив), такие же, как растворы, разгружающиеся на дне на 21° с.ш. ВТП.

Для решения в полном объеме этой проблемы необходимо изучить изменение химического состава осадков в недрах гидротермальных систем, которое происходит в процессе взаимодействия вода–порода в высокотемпературных условиях. Возможность такого изучения появилась, когда были пробурены глубоководные скважины на гидротермальных полях с действующими высокотемпературными гидротермальными источниками в осевых долинах океанических хребтов. Такие скважины были пробурены в северо-восточной части Тихого океана около Северо-Американского континента, на хребтах Хуан де Фука и Горда, перекрытых плейстоценовыми осадками мощностью в несколько сотен метров. Первоочередным объектом для данного исследования является гидротермальное поле “Dead Dog” в Срединной Долине хребта Хуан де Фука, на котором пробурена серия скважин (858А, В, С, D, F), расположенных на разном удалении от “черных курильщиков”.

На сегодняшний день изменения химического состава осадков внутри конвективных гидротермальных систем в океанических хребтах, перекрытых осадками, и соответственно влияние осадочного покрова на трансформацию металлоносных растворов, практически не изучены. Например, в скважине 858В изучение изменений химического состава осадков и оценка привноса/потери химических элементов проведены только для одного образца на весь разрез [Goodfellow, Peter, 1994]. Результаты силикатного анализа приведены в таком виде, что ими невозможно было воспользоваться в нашей работе. Кроме того, было изучено ограниченное количество микроэлементов в соответствии с возможностями метода РФА, редкоземельные элементы не изучались.

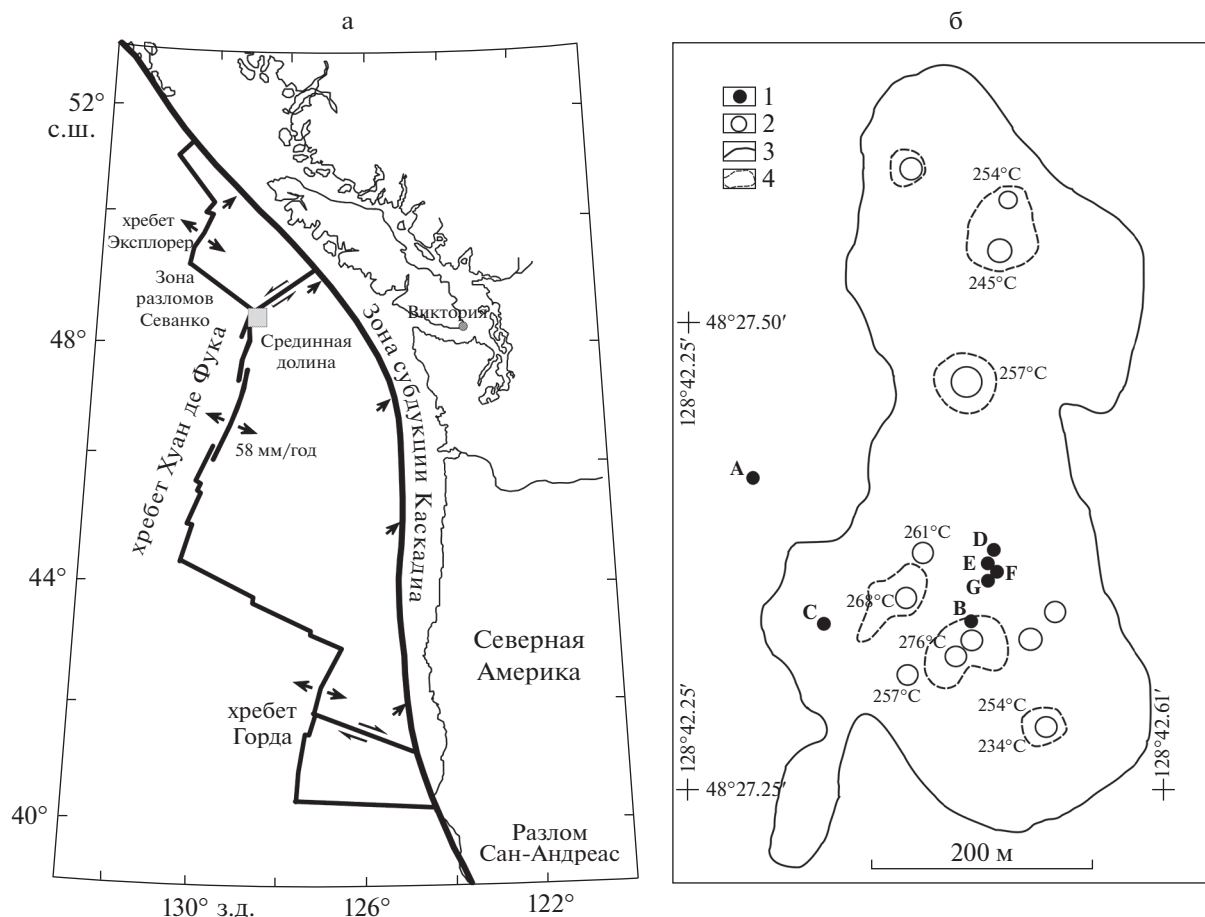
Решение этой задачи целесообразно было начать с изучения изменений химического состава осадков в наиболее высокотемпературной части гидротермальной системы, внутри которой на расстоянии в 20 м от “черного курильщика” с температурой 276°С пробурена скважина 858В.

Для решения поставленной задачи были использованы материалы скважины 858В и, прежде всего, 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).

В статье обсуждаются результаты определения содержания химических элементов в осадках из скважины 858В, а также в неизмененных фоновых осадках из скважин 855А, С, D методами рентгено-флюоресцентного анализа (РФА) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП МС), и изучения изменений химического состава этих осадков в процессе взаимодействия раствор–осадки. В статье также показано влияние осадочного покрова на изменение состава гидротермального раствора, исходя из представления о том, что в процессе взаимодействия раствор–осадки при уменьшении содержания химических элементов в осадках увеличивается их содержание в растворе и, наоборот, при увеличении содержания химических элементов в осадках соответственно раствор ими обедняется. Геохимический анализ в настоящей статье имеет предварительный характер, так как до настоящего времени все еще нет результатов детального изучения химического состава терригенных и новообразованных минералов и, прежде всего глинистых минералов, методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Срединная Долина хребта Хуан де Фука (рис. 1) является тектономагматической структурой среднескоростного спрединга (58 мм/год) [Davis et al., 1992; Davis, Villinger, 1992] (см. рис. 1а). В ней расположено гидротермальное поле “Dead Dog” размером 800 × 400 м с высоким тепловым потоком (до 835 W/m<sup>2</sup>) и с 15 гидротермальными металлоносными источниками на дне с температурой от 268 до 276°С [Davis, Villinger, 1992]. В Срединной Долине накопилось несколько сотен метров плейстоценовых гемипелагических осадков с редкими прослоями дистальных турбидитов [Davis et al., 1992]. На этом гидротермальном поле, в рейсе 139 ODP (Ocean Drilling Program) в плейстоценовых гемипелагических осадках с прослоями дистальных турбидитов были пробурены скважины 858А, В, С, D, F через толщу воды от 2409 до 2416 м. Эти скважины расположены на разном



**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 858A, B, C, D, F, G, гидротермальных источников и гидротермальных холмов в районе гидротермального поля “Dead Dog” [Davis et al., 1992] (б).

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

удалении от гидротермальных источников (см. рис. 1б). В непосредственной близости от гидротермального источника (“черного курильщика”) с температурой 276°C, в 20 м от него, пробурена скважина 858В глубиной 38.6 м (рис. 2), в которой на глубине 19.5 м замерена температура 197°C [Davis et al., 1992].

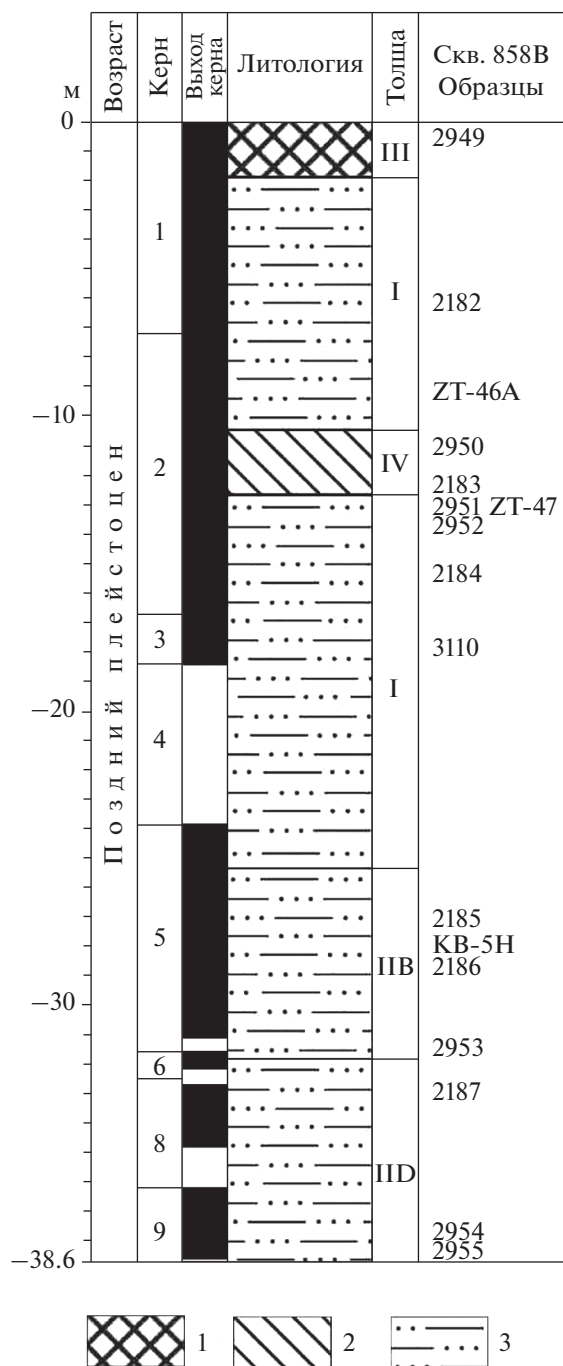
Скважины 855А, С, D расположены у подножия восточного борта Срединной Долины в районе с низким тепловым потоком. В этих неизменных фоновых осадках поровой водой является холодная морская вода [Davis et al., 1992].

Осадки из скважин, которые были пробурены в рейсе 139 ODP, его участники подразделили на следующие Толщи I, IIА, IIВ, IIС, IIД, III, IV [Davis et al., 1992]. В скважине 858В выделены Толщи I, IIВ, IIД, III, IV. Их вещественный состав определен во время рейса при визуальном описании керна и при изучении в оптическом микроскопе.

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). Осадки биотурбированы. Они содержат слюду, амфиболы, циркон, в небольших количествах локально присутствуют пирит, кальцит, глауконит, непрозрачные рудные минералы. Биогенные компоненты – фораминиферы, диатомеи, радиолярии, наннофосилии.

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

Толща IIД (31.83–38.60 м) – окремненные, гидротермально измененные аргиллиты и алевролиты, содержат рассеянный пирит (до 5%), примесь кварца, полевых шпатов, слюды, цеолиты.



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

та, жилки ангидрита. Небольшие редкие пустоты заполнены ангидритом. Локально встречается примесь сфалерита, цоизита, эпидота.

Толща III (0–1.97 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 Толще IV слои сульфидов (пирита) мощностью 3–20 см переслаиваются с глиной, содержащей пирит и ангидрит. Участники рейса 139 предположили, что Толща IV образовалась в результате отложения сульфидов из рудообразующего флюида, движущегося латерально по хорошо проницаемым горизонтам.

Позже это предположение было уточнено [Сахаров, Курносов, 2022]. Было сделано заключение, что формирование сульфидной Толщи IV связано с горизонтальным тектоническим разрывом осадочного покрова, который произошел в условиях спрединга в Срединной Долине хребта Хуан де Фука. Этот разрыв достиг центрального канала гидротермальной системы, в котором под большим давлением поднимается горячий (около 300–350°C) металлоносный флюид и который разгружается на дне в виде “черного курильщика”. При попадании в морскую воду он образует сульфидный холм. То же самое происходит и в зоне горизонтального разрыва в осадочном покрове. Гидротермальный металлоносный флюид из вертикального центрального канала гидротермальной системы под большим давлением поступает в этот разрыв, встречается с морской водой, которая проникла в разрыв с флангов гидротермальной системы и явилась геохимическим барьером, благодаря которому в этом разрыве отложились сульфиды.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержание макроэлементов в осадках из скважины 858В, а также из скважин 855А, С, D, определено методом РФА и другими химическими методами анализа в лаборатории химико-аналитических исследований в Геологическом институте РАН. Содержание в осадках микроэлементов, включая редкоземельные элементы, определено методом ИСП МС в лаборатории ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН.

Изменение химического состава осадков из скважины 858В определялось сравнением их химического состава с содержанием химических элементов в неизмененных фоновых осадках (реперах) из скважин 855А, С, D и показано на рисунках в виде спайдерграмм отдельно для каждого изученного образца, нормированного по образцу неизмененного осадка. Такие пары выбраны на

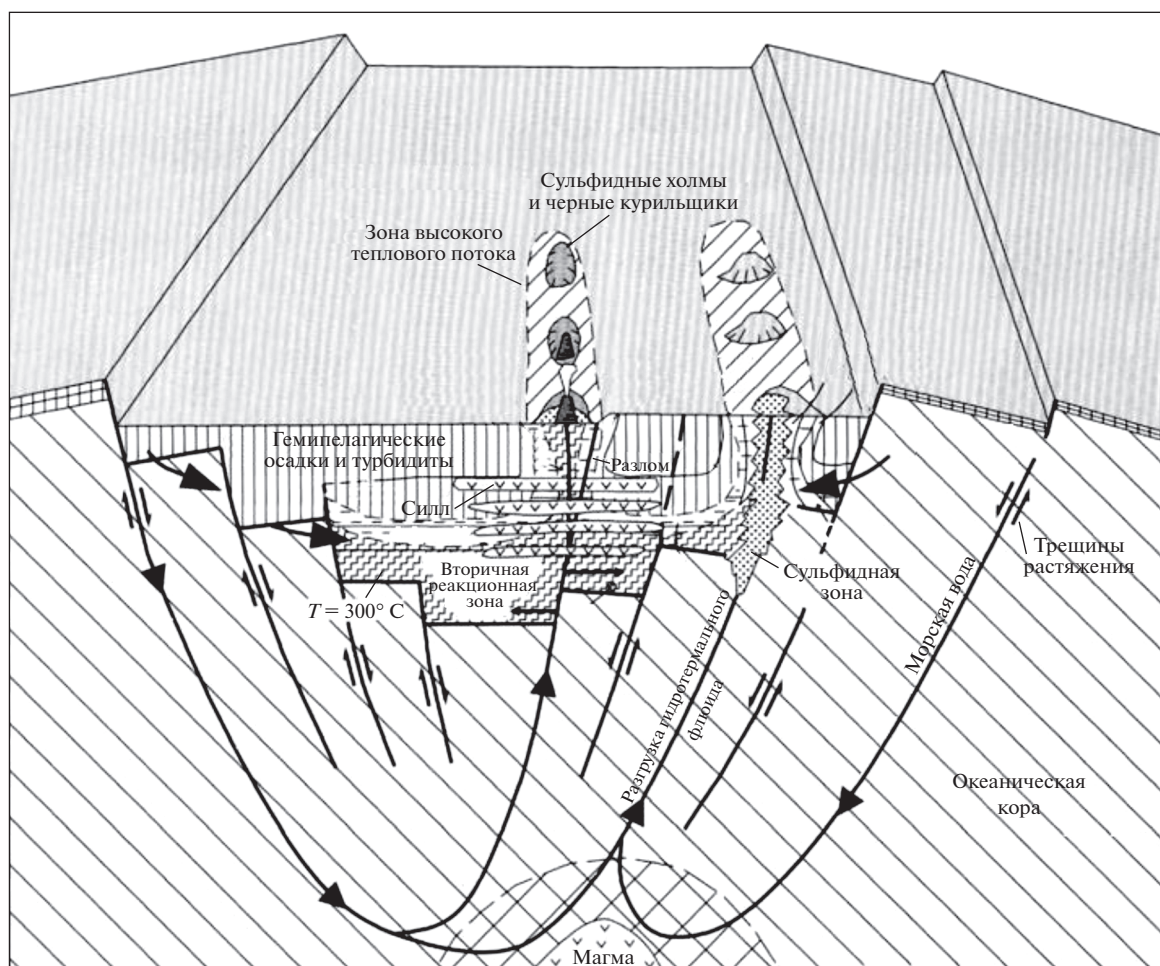


Рис. 3. Блок-диаграмма гидротермальной системы в Срединной Долине хребта Хуан де Фука ([Goodfellow, Franklin, 1993] с изменениями).

основе просмотра петрографических шлифов и данных гранулометрического анализа. Следует отметить, что не для всех образцов гидротермально измененных осадков из скважины 858В есть соответствующие по петрографическим и гранулометрическим данным образцы неизмененных фоновых осадков из скважин 855А, С, D. Для них спайдерграммы не делались.

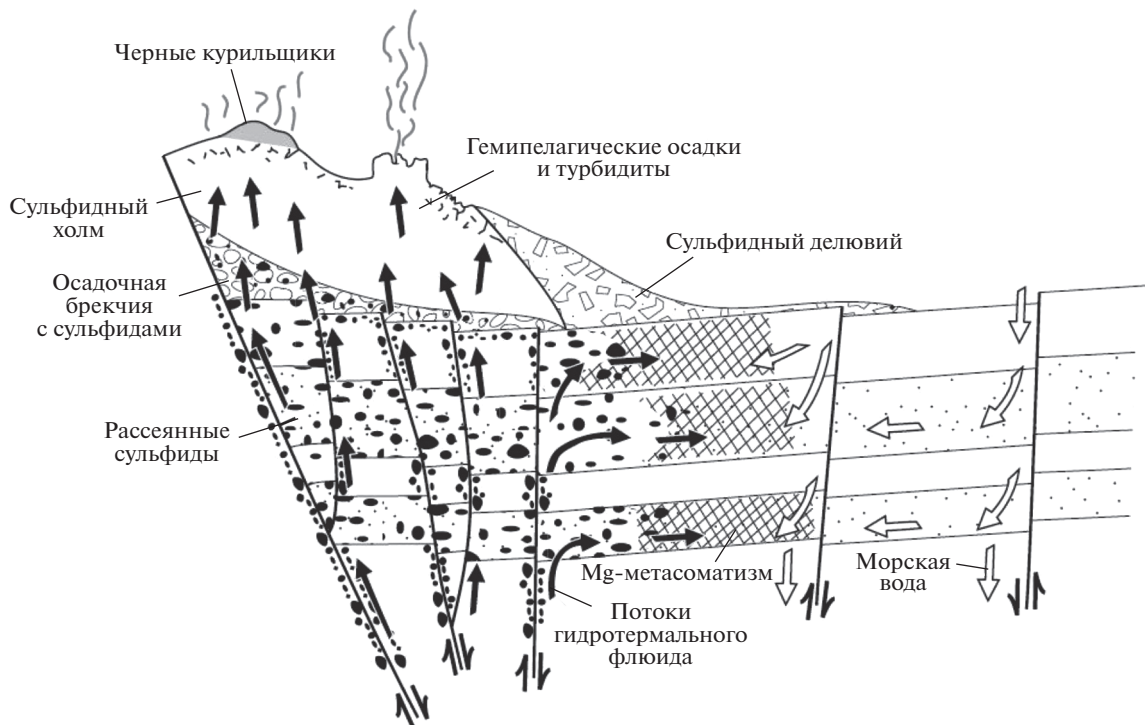
Минеральный состав осадков из скважины 858В был детально изучен ранее разными методами (петрографическое описание, рентгеновская дифрактометрия, сканирующая электронная микроскопия) в валовых образцах и во фракциях <math><0.001\text{ мм}</math> и <math>0.001\text{--}0.01\text{ мм}</math>, <math><0.002\text{ мм}</math>, а также в иммерсионных жидкостях во фракции <math>0.1\text{--}0.05\text{ мм}</math>, разделенной в бромформе на тяжелую и легкую фракции [Kurnosov et al., 1994; Leybourne, Goodfellow, 1994; Buatier et al., 1994, 1995; Goodfellow, Peter, 1994]. Недавно глинистые минералы осадков из скважины 858В были изучены методом компьютерного моделирования рентгеновских

дифракционных картин, полученных от ориентированных препаратов, в сочетании с разложением профилей рефлексов 060 на индивидуальные максимумы [Сахаров, Курносов, 2022]. В результате получены наиболее точные на сегодняшний день данные по структуре глинистых минералов и их ассоциациям, оценено количественное соотношение глинистых минералов в смесях.

### СХЕМЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В СРЕДИННОЙ ДОЛИНЕ

Представление о конвективной гидротермальной системе в Срединной Долине хребта Хуан де Фука показано на рис. 3.

На рис. 4 схематично изображено представление о вертикальных и горизонтальных потоках гидротермального флюида в осадках в центральном канале гидротермальной системы и в прилегающих к нему осадках. В осадках, прилегающих к каналу подъема гидротермального флюида, не только поддерживается высокая температура (на-



**Рис. 4.** Модель гидротермальной системы в зоне подъема и разгрузки гидротермальных растворов и зоны прилегающих осадков с потоками гидротермальных растворов и морской воды ([Zierenberg et al., 1993] с изменениями).

пример, в расположенной в 20 м от гидротермального источника скважине 858В на глубине 19.5 м температура 197°C), но, согласно этой схеме, в них происходит миграция растворов. В результате в процессе взаимодействия вода–порода изменяется минеральный и химический состав осадков и трансформируется состав растворов. На рис. 4 отражено также представление о горизонтальных потоках морской воды, поступающей с флангов гидротермальной системы в осадочный покров по хорошо проницаемым зонам, которые связаны со слоями песчанистых осадков и тектоническими разрывами, образующимися в условиях спрединга.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Содержание химических элементов в неизмененных осадках*

Результаты определения содержания макроэлементов, микроэлементов и РЗЭ в неизмененных фоновых осадках из скважин 855А, С, D (Толща I) показаны в табл. 1, 2, 3. Эти данные использованы при построении спайдерграмм в качестве реперов для сравнения с гидротермально измененными в разной степени осадками из скважины 858В.

### *Изменения содержания химических элементов в осадках Толщ I, IIВ, IIД из скважины 858В*

Химический состав осадков из скважины 858В показан в табл. 4, 5, 6.

**Толща I.** Участники рейса 139 ODP отнесли всю Толщу I к неизмененным осадкам [Davis et al., 1992]. Полученные нами данные по химическому составу осадков Толщи I и степени изменения содержания химических элементов в них, дали возможность рассмотрения на новом уровне этого вывода, сделанного при визуальном и микроскопическом изучении участниками рейса 139 ODP.

В осадках верхней части Толщи I (1.97–10.41 м, образцы 2182 и ZT-46A) наряду с макроэлементами, содержание которых осталось без изменения или слабо изменилось, есть макроэлементы, содержание которых заметно увеличилось (рис. 5). В два раза увеличилось содержание Mg и S (обр. 2182 и ZT-46A). Примерно также увеличилось содержание Ca (обр. ZT-46A) и P, F, I (обр. 2182).

Содержание части микроэлементов также осталось без изменения или изменилось слабо. В то же время концентрации, хотя и небольшой их части, заметно изменились в этих осадках (рис. 6). Наиболее сильно увеличилось содержание Cu и Bi (обр. 2182) и Mo (обр. ZT-46A), концентрации As и Cd заметно уменьшились в обр. 2182.

Таблица 1. Химический состав (вес. %) неизмененных осадков из скважин 855А, С, D, Срединная Долина, хребет Хуан де Фука

Образец	2857	2858	2146	2859	2147	2860	2148	2861	2862	2863	2864	2865	2149	2866	2867	2868
Скважина	855А	855А	855А	855А	855А	855А	855А	855А	855С	855С	855С	855С	855С	855С	855D	855D
Керн-секция,	1R-1,	1R-1,	1R-4,	4R-1,	4R-3,	6R-2,	7R-3,	8R-1,	7R-1,	7R-4,	10R-4,	10R-4,	11R-1,	3R-1,	4R-1,	4R-CC,
интервал (см)	0-5	125-130	50-55	105-110	96-98	15-19	65-67	0-5	65-67	72-76	40-44	60-64	115-119	10-15	18-23	20-25
Толща	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Глубина, м	0.00	1.25	5.20	27.05	29.96	47.15	58.75	64.80	56.75	61.32	88.30	88.50	95.75	94.80	104.48	105.00
SiO <sub>2</sub>	57.86	55.19	54.21	51.85	48.44	57.71	59.20	56.13	57.41	57.46	57.29	64.34	63.79	57.87	64.44	55.52
TiO <sub>2</sub>	0.79	0.89	0.87	0.85	0.74	0.91	0.77	0.75	0.92	0.85	0.93	0.72	0.82	0.89	0.68	0.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.82	15.58	15.14	16.09	13.20	15.65	12.36	13.80	15.75	15.43	16.08	14.10	14.11	15.64	14.42	15.86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.22	4.41	4.75	5.48	4.16	4.07	3.47	4.21	4.01	3.78	3.38	3.01	3.20	3.50	3.07	3.74
FeO	2.08	2.36	2.26	2.86	1.93	3.18	2.09	1.94	3.30	2.81	3.78	2.08	2.42	3.62	2.06	3.53
MnO	0.08	0.09	0.12	0.14	0.20	0.12	0.10	0.11	0.12	0.12	0.10	0.07	0.09	0.09	0.07	0.11
MgO	3.38	3.44	3.75	4.23	3.54	4.00	3.31	3.41	4.03	3.64	4.15	2.86	2.57	4.04	2.96	4.95
CaO	4.16	4.23	5.88	4.14	11.29	3.58	5.01	5.43	3.58	4.47	3.40	4.47	4.55	3.56	3.80	3.71
Na <sub>2</sub> O	4.49	4.03	3.07	4.04	2.89	4.02	3.32	4.00	3.92	4.10	3.38	4.43	4.00	3.63	4.51	3.26
K <sub>2</sub> O	2.07	2.46	2.23	2.38	2.07	1.92	2.06	1.84	1.93	1.95	2.20	1.46	1.35	1.94	1.54	2.37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	0.18	0.24	0.16	0.27	0.16	0.16	0.13	0.17	0.18	0.18	0.16	0.17	0.19	0.15	0.19
п.п.п.	6.38	7.20	7.52	7.62	11.24	4.42	7.95	8.35	4.62	5.01	4.81	1.87	2.85	4.38	2.02	5.59
Сумма	100.51	100.06	100.03	99.85	100.00	99.75	99.80	100.11	99.79	99.81	99.67	99.58	99.92	99.37	99.71	99.75
H <sub>2</sub> O-	1.54	1.82	1.96	2.47	2.15	1.50	2.26	2.12	1.67	1.56	1.69	0.71	0.68	1.49	0.78	1.69
CO <sub>2</sub>	0.05	1.20	2.32	0.50	6.23	0.05	2.19	0.55	0.05	0.05	0.07	0.07	0.64	0.05	0.05	1.00
C <sub>орг</sub>	0.30	0.05	н.о.	0.20	н.о.	0.10	н.о.	0.30	0.05	0.05	0.05	0.05	н.о.	0.05	0.07	0.07
S	0.14	0.16	0.23	0.33	0.40	0.16	0.58	0.36	0.14	0.34	0.17	0.35	0.17	0.44	0.16	0.13
F	0.02	0.03	0.04	0.03	0.06	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
I	23.06	24.17	42.00	8.57	32.00	2.50	11.00	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
Br	46.52	53.74	50.00	52.30	45.00	24.85	42.50	40.74	24.85	27.74	19.08	8.97	9.38	17.63	7.52	19.08
Cl	0.87	0.90	1.26	0.84	1.04	0.48	1.41	0.75	0.46	0.52	0.30	0.35	0.48	0.36	0.26	0.29

Примечание. н.о. — не определяется.

Таблица 2. Содержание микроэлементов (мкг/г) в неизмененных осадках из скважин 855А, С, D, Срединная Долина, хребет Хуан де Фука

Образец	2857	2858	2146	2859	2147	2860	2148	2861	2862	2863	2864	2865	2149	2866	2867	2868
Скважина	855А	855А	855А	855А	855А	855А	855А	855А	855С	855С	855С	855С	855С	855D	855D	855D
Керн-секция, интервал (см)	1R-1, 0-5	1R-1, 125-130	1R-4, 50-55	4R-1, 105-110	4R-3, 96-98	6R-2, 15-19	7R-3, 65-67	8R-1, 0-5	7R-1, 65-67	7R-4, 72-76	10R-4, 40-44	10R-4, 60-64	11R-1, 115-119	3R-1, 10-15	4R-1, 18-23	4R-CC, 20-25
Толща	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Глубина, м	0.00	1.25	5.20	27.05	29.96	56.75	58.75	64.80	56.75	61.32	88.30	88.50	95.75	94.80	104.48	105.00
Li	41.7	43.4	44.2	53.2	46.3	34.0	46.7	51.2	37.1	38.7	47.3	22.7	18.9	38.3	21.5	50.9
Be	1.5	1.9	1.4	1.4	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.5	1.1	1.0	1.2	1.2	1.4
Sc	16.9	18.5	18.1	16.6	15.6	22.4	14.3	15.9	22.5	16.0	17.1	15.1	17.0	17.5	13.3	18.4
V	144	157	146	171	132	157	116	128	163	149	169	126	144	151	119	140
Cr	109	76.4	81.0	78.0	72.1	85.7	65.4	71.9	94.9	64.7	76.6	56.4	70.3	70.1	57.6	77.9
Co	15.9	17.8	24.8	22.8	16.6	19.7	12.6	15.0	22.1	17.3	17.8	12.8	13.5	16.6	12.0	19.3
Ni	56.9	38.8	57.6	58.8	49.7	43.8	50.1	56.0	52.8	47.8	43.4	26.2	26.8	37.3	27.6	45.9
Cu	44.8	36.7	62.0	65.7	44.0	44.4	38.8	47.5	49.4	42.8	46.4	21.9	23.7	39.9	19.6	45.1
Zn	371	194	137	140	103	84.0	120	147	94.4	103	104	61.3	63.3	105	74.0	114
Ga	17.4	19.2	18.6	19.1	16.2	17.3	16.1	16.2	17.6	17.7	18.7	14.5	14.0	17.1	14.6	19.8
As	1.1	4.4	7.5	6.9	5.0	5.3	5.0	4.3	4.0	5.4	5.3	6.2	7.9	13.3	5.6	6.6
Rb	73.8	102	83.9	52.7	81.0	50.9	62.3	66.6	52.6	52.1	42.6	36.8	30.6	39.7	30.1	68.3
Sr	313	269	355	297	484	269	293	346	283	328	225	324	326	244	341	265
Y	22.7	29.7	23.4	21.0	21.4	26.7	21.0	20.8	25.6	21.6	23.5	19.7	22.2	22.8	18.7	22.9
Zr	104	139	105	83.5	89.6	114	121	110	113	100	117	100	107	106	94.0	104
Nb	10.8	14.1	8.6	7.4	7.9	9.2	8.8	8.2	9.0	7.9	9.2	6.4	6.2	7.8	6.2	8.8
Mo	1.4	8.6	1.1	1.7	0.98	1.2	3.3	2.5	1.0	1.9	0.89	0.45	0.63	2.0	1.0	1.2
Ag	0.21	0.077	0.10	0.23	0.23	0.12	0.20	0.22	0.11	0.21	0.10	0.062	0.064	0.095	0.062	0.12
Cd	0.35	0.15	0.24	0.34	0.27	0.092	0.42	0.56	0.12	0.30	0.18	0.089	0.095	0.13	0.10	0.16
Sb	0.56	0.90	0.94	0.78	0.72	0.59	0.83	0.88	0.68	0.76	0.50	0.51	0.51	0.62	0.53	0.48
Cs	4.2	6.7	3.8	4.0	3.8	2.7	3.2	3.4	2.8	3.0	3.2	1.3	1.0	2.4	1.3	3.6
Ba	982	728	886	735	888	515	747	933	538	625	420	455	429	418	483	521
Hf	3.0	4.0	2.8	2.2	2.4	3.3	3.2	2.9	3.3	2.7	3.1	2.8	2.9	2.9	2.7	2.8
Ta	0.68	0.93	0.61	0.50	0.53	0.59	0.64	0.58	0.57	0.58	0.64	0.46	0.45	0.57	0.47	0.63
W	0.94	1.6	0.85	0.75	0.75	0.82	0.75	0.76	0.79	0.72	0.80	0.49	0.76	0.67	0.44	0.77
Tl	0.47	0.53	0.41	0.39	0.39	0.35	0.40	0.45	0.37	0.36	0.31	0.21	0.19	0.28	0.21	0.35
Pb	17.3	26.5	13.3	12.8	14.6	8.4	12.5	23.5	9.1	10.3	10.1	6.8	5.8	11.1	7.7	12.0
Bi	0.20	0.31	0.16	0.16	0.16	0.15	0.11	0.14	0.14	0.14	0.16	0.056	0.047	0.11	0.063	0.17
Th	6.6	9.2	5.8	4.8	5.6	4.7	5.2	5.1	4.9	4.7	5.0	3.7	3.3	4.4	3.6	5.6
U	2.7	3.1	2.5	1.9	3.8	1.9	3.0	3.4	1.7	2.0	1.5	1.3	1.3	1.4	1.1	2.1



Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов (мкг/г) в неизмененных осадках из скважин 855А, С, D, Срединная Долина, хребет Хуан де Фука

Образец	Скважина	Керн-секция, интервал (см)	Толща	Глубина, м	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
2857	855А	1R-1, 0–5	I	0.00	21.4	46.1	5.4	22.1	4.7	1.1	4.4	0.66	3.9	0.80	2.4	0.33	2.3	0.34
2858	855А	1R-1, 125–130	I	1.25	27.6	60.2	7.0	27.8	6.0	1.4	5.6	0.87	5.0	1.0	3.1	0.43	2.9	0.43
2146	855А	1R-4, 50–55	I	5.20	20.3	41.9	4.9	20.3	4.3	1.1	4.2	0.70	3.8	0.8	2.2	0.3	2.2	0.31
2859	855А	4R-1, 105–110	I	27.05	15.3	30.9	3.8	15.7	3.6	0.9	3.5	0.60	3.2	0.7	1.9	0.3	1.9	0.28
2147	855А	4R-3, 96–98	I	29.96	18.6	36.1	4.3	17.6	3.7	0.9	3.6	0.60	3.3	0.7	2.0	0.3	1.9	0.29
2860	855А	6R-2, 15–19	I	56.75	17.5	38.2	4.7	19.8	4.6	1.2	4.5	0.74	4.5	0.92	2.8	0.38	2.6	0.41
2148	855А	7R-3, 65–67	I	58.75	18.1	38.2	4.4	17.8	3.9	0.9	3.7	0.60	3.4	0.7	2.0	0.3	2.0	0.30
2861	855А	8R-1, 0–5	I	64.80	17.3	36.6	4.2	17.1	3.7	0.9	3.6	0.60	3.2	0.7	2.0	0.3	2.0	0.30
2862	855С	7R-1, 65–67	I	56.75	16.9	37.5	4.6	19.5	4.6	1.2	4.5	0.73	4.4	0.90	2.8	0.38	2.5	0.40
2863	855С	7R-4, 72–76	I	61.32	17.1	34.2	4.3	17.6	3.9	1.0	3.7	0.60	3.3	0.7	2.1	0.3	2.0	0.29
2864	855С	10R-4, 40–44	I	88.30	17.0	34.9	4.3	18.1	4.1	1.0	4.0	0.60	3.6	0.8	2.2	0.3	2.2	0.34
2865	855С	10R-4, 60–64 11R-1, 115–	I	88.50	15.9	33.2	4.1	16.7	3.6	1.0	3.6	0.50	3.2	0.6	2.0	0.3	1.8	0.28
2149	855С	119	I	95.75	15.4	32.8	4.0	16.4	3.7	1.0	3.7	0.60	3.5	0.7	2.1	0.3	2.1	0.32
2866	855D	3R-1, 10–15	I	94.80	16.0	34.6	4.2	17.4	3.9	1.0	3.9	0.60	3.6	0.7	2.2	0.3	2.1	0.32
2867	855D	4R-1, 18–23	I	104.48	15.0	30.5	3.8	15.6	3.4	0.9	3.3	0.50	3.0	0.6	1.8	0.3	1.7	0.27
2868	855D	4R-CC, 20–25	I	105.00	18.1	37.6	4.6	18.3	4.1	1.0	4.0	0.60	3.6	0.7	2.2	0.3	2.1	0.32

Таблица 4. Химический состав (вес. %) осадков из скважины 858В, Срединная Долина, хребет Хуан де Фука

Образец	2949	2182	ZT-46A	2950	2183	2951	2952	2184	3110	2185	2186	2953	2187	2954	2955
Скважина	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В
Керн-секция, интервал (см)	1Н-1, 57-61	1Н-5, 14-18	2Н-2, 50-53	2Н-3, 85-88	2Н-4, 62-64	2Н-4, 131-133	2Н-5, 47-52	2Н-6, 69-71	3Н-1, 118-123	5Н-3, 21-24	5Н-4, 27-29	6Н-1, 6-8	8Х-1, 13-15	8Х-5, 10-14	9Х-5, СС 7-12
Толща	III	I	I	IV	IV	I	I	I	I	IIB	IIB	IIB	IIB	IIB	IIB
Глубина, м	0.57	6.14	9.20	11.05	12.32	13.01	13.67	15.39	17.88	27.11	28.67	31.55	32.83	37.80	38.37
SiO <sub>2</sub>	51.21	54.61	46.23	13.73	21.50	63.05	66.53	60.28	49.54	43.41	41.20	37.99	73.77	35.81	74.07
TiO <sub>2</sub>	0.37	0.87	0.65	0.02	0.30	0.71	0.57	0.83	0.52	0.38	0.63	0.39	0.37	0.31	0.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.95	14.37	13.35	1.70	8.28	14.15	11.99	13.87	12.69	10.59	13.53	12.97	6.93	9.93	7.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.77	4.61	2.42	42.40	19.90	5.04	4.93	2.06	2.62	2.78	3.30	9.08	2.87	13.15	2.23
FeO	0.41	2.01	2.29	0.43	0.76	1.51	1.15	3.88	5.39	2.38	1.64	9.50	4.69	5.15	2.42
MnO	0.16	0.10	0.11	0.06	0.11	0.64	0.07	0.09	0.16	0.21	0.22	0.25	0.09	0.16	0.07
MgO	14.10	6.43	8.11	7.39	13.6	4.66	4.90	7.45	17.89	27.71	31.16	17.67	5.54	16.25	9.95
CaO	0.94	3.79	7.57	0.15	13.5	0.70	1.02	1.15	1.75	1.31	1.34	2.00	0.47	5.30	0.24
Na <sub>2</sub> O	4.57	2.76	2.61	1.66	1.03	2.66	2.15	3.13	0.55	1.36	1.10	0.36	1.18	1.42	0.26
K <sub>2</sub> O	0.99	2.53	1.91	0.17	0.13	1.15	1.35	1.81	0.13	0.08	0.08	0.07	0.04	0.14	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.27	0.18	0.03	0.28	0.12	0.13	0.18	0.26	0.02	0.03	0.22	0.06	0.13	0.03
п.п.п.	14.91	7.71	14.45	32.16	20.36	5.64	5.29	5.09	7.56	9.78	5.31	8.78	3.33	12.44	3.54
Сумма	100.44	100.05	99.88	99.91	99.81	100.01	100.07	99.82	99.05	100.00	99.55	99.27	99.34	100.20	100.46
CO <sub>2</sub>	0.03	2.39	10.75	0.05	0.10	0.05	0.05	0.33	0.58	0.10	0.10	0.05	0.10	0.05	0.05
C <sub>орг</sub>	0.1	н.о.	0.05	0.1	н.о.	0.05	0.05	н.о.	0.10	н.о.	н.о.	0.05	н.о.	0.05	0.05
S	0.45	0.56	0.31	35.50	10.10	1.10	0.88	0.48	0.46	0.16	0.30	1.31	0.13	7.32	0.01
F	0.03	0.06	0.04	0.25	0.10	0.02	0.02	0.04	0.05	0.01	0.01	0.02	0.05	0.03	0.02
I	105.5	15.0	2.5	2.5	43.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	30.0	2.5	15.0	2.5	2.5
Br	151.0	39.0	20.5	2.0	20.0	8.0	9.0	34.0	38.6	30.0	37.0	1.5	14.0	18.0	6.1
Cl	1.93	1.28	0.35	0.03	0.24	0.09	0.12	1.67	0.66	1.30	1.15	0.01	1.17	0.52	0.11

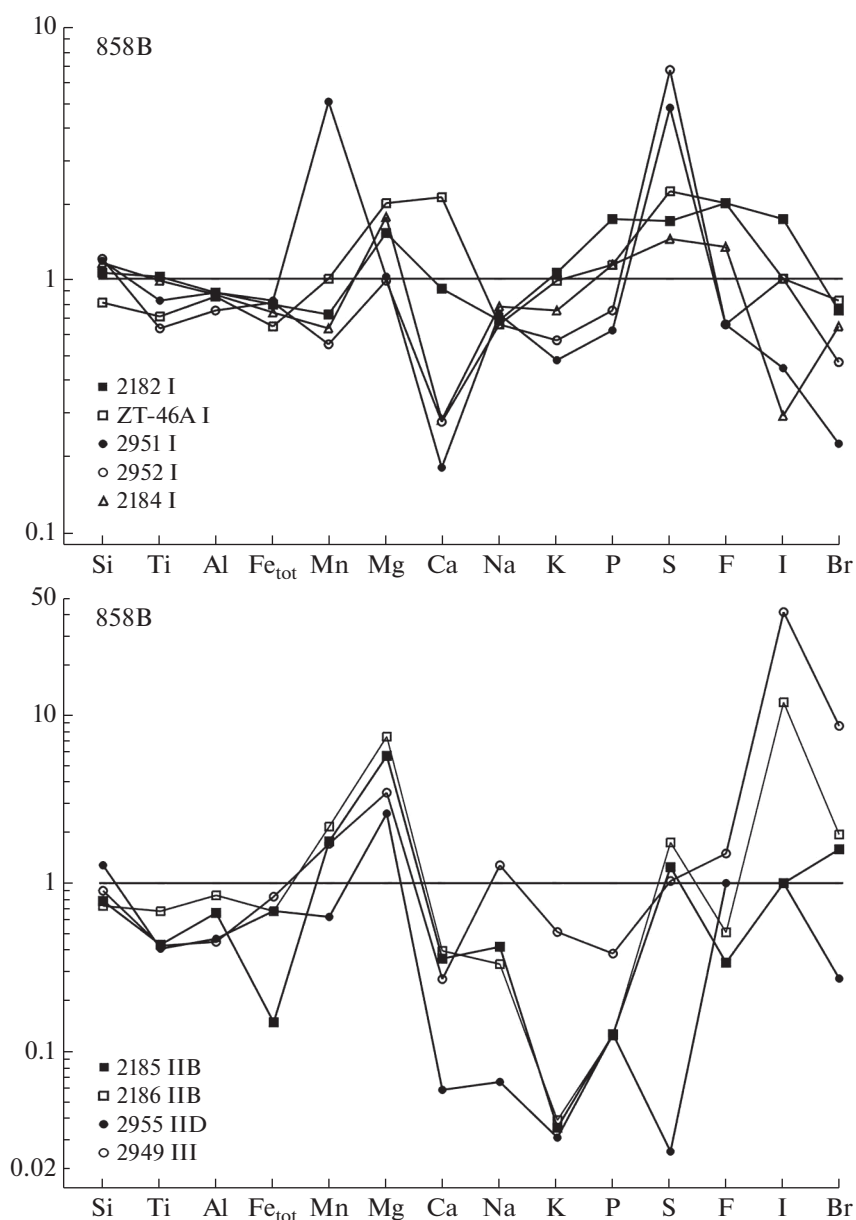
Примечание. н.о. — не определялся.

Таблица 5. Содержание микроэлементов (мкг/г) в осадках из скважины 858В, Срединная Долина, хребет Хуан де Фука

Образец	2949	2182	ZT-46A	2951	2950	2183	ZT-47	2952	2184	3110	2185	KB-5H	2186	2953	2187	2954
Скважина	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В	858В
Керн-секция, интервал (см)	1Н-1, 57-61	1Н-5, 14-18	2Н-2, 50-53	2Н-4, 131-133	2Н-3, 85-88	2Н-4, 62-64	2Н-4, 96-98	2Н-5, 47-52	2Н-6, 69-71	3Н-1, 118-123	5Н-3, 21-24	5Н-4, 14-18	5Н-4, 27-29	6Н-1, 6-8	8Х-1, 13-15	8Х-5, 10-14
Толща	III	I	I	I	IV	IV	IV	I	I	I	IIВ	IIВ	IIВ	IIВ	III	III
Глубина, м	0.57	6.14	9.20	13.01	11.05	12.32	12.66	13.67	15.39	17.88	27.11	28.54	28.67	31.55	32.83	37.80
Li	62.2	39.4	27.8	32.1	3.2	16.8	18.7	34.7	31.3	30.9	20.2	31.2	40.4	22.8	17.2	12.8
Be	1.3	1.6	1.2	1.3	0.1	0.3	0.5	1.0	1.1	0.6	0.69	1.0	1.0	0.5	0.3	0.3
Sc	7.6	14.6	11.0	14.4	0.3	4.9	5.5	10.3	18.0	10.3	15.9	10.7	15.9	10.0	7.5	5.5
V	87.2	128	117	118	22.7	150	169	111	146	105	121	91.5	131	86.7	51.2	56.4
Cr	39.2	73.7	59.0	68.7	3.7	34.5	46.6	60.6	79.4	62.4	67.2	61.7	88.7	55.1	39.0	39.6
Co	9.8	15.5	17.0	7.6	6.5	14.0	21.2	7.1	15.3	14.7	12.8	19.3	12.7	20.2	8.5	22.6
Ni	43.0	34.6	40.6	27.7	4.4	16.5	25.2	28.6	45.1	37.4	39.5	44.4	45.8	40.0	21.6	27.7
Cu	1733	144	36.2	50.8	1317	887	5125	101.3	50.6	201	4.6	9.0	7.9	3748	25.8	4713
Zn	740	141.2	92.8	114.8	4162	445	12668	128.4	280.1	843	73.6	56.4	52.7	5298	56.4	5234
Ga	12.6	17.3	13.6	14.1	2.6	9.4	10.8	13.5	14.1	11.7	20.5	14.2	16.9	19.0	7.6	10.1
As	8.6	1.2	4.1	20.0	110.6	14.9	0.03	25.3	11.2	5.7	4.3	7.6	4.1	1.5	0.4	15.1
Rb	44.1	54.9	62.9	62.5	2.2	2.5	20.7	47.4	55.6	3.3	2.5	2.2	2.4	1.7	1.7	2.7
Sr	247	176	149	130	15	290	41	78	80	26	33	41	38	31	14	110
Y	11.9	22.7	23.8	9.5	0.9	5.3	12.6	10.8	14.1	19.4	13.6	14.1	20.8	13.6	9.4	6.9
Zr	56	114	85	91	4	29	36	87	92	67	121	80	114	54	52	36
Nb	4.4	10.1	7.1	8.9	0.3	3.0	3.9	7.8	8.0	6.7	11.8	10.5	12.6	5.4	5.3	2.9
Mo	2.2	1.3	2.7	2.4	80.6	8.9	15.7	2.8	1.7	3.9	19.6	4.3	40.4	22.3	2.5	15.0
Ag	2.4	0.19	0.09	0.5	14.5	7.7	7.6	0.62	0.2	0.5	0.04	0.2	0.3	1.7	0.1	5.2
Cd	0.77	0.07	0.17	0.06	6.78	0.92	39.50	0.22	0.81	1.06	<ПО	0.15	0.02	12.73	0.07	14.54
Sb	2.22	0.51	0.48	2.18	21.48	3.09	1.63	2.3	1.28	0.66	<ПО	0.34	0.61	0.50	0.14	3.43
Cs	2.5	4.7	4.0	2.3	0.1	0.3	1.0	1.8	1.6	0.3	0.26	0.2	0.1	0.1	0.0	0.2
Ba	3271	668	552	1071	6	17	405	246	296	47	12	14	29	194	29	935
Hf	1.4	3.1	2.2	2.4	0.1	0.8	1.0	2.1	2.5	1.9	2.9	2.2	3.0	1.5	1.4	1.0
Ta	0.31	0.68	0.5	0.57	0.01	0.20	0.27	0.51	0.50	0.46	0.77	0.69	0.91	0.41	0.33	0.21
W	0.53	1.04	0.9	0.98	0.08	0.40	0.62	1.0	0.90	0.34	0.90	0.53	0.50	0.39	0.21	1.5
Tl	0.87	0.39	0.34	0.40	32.21	1.64	2.17	0.28	0.34	0.10	0.04	0.07	0.14	0.12	0.01	1.07
Pb	617	19.6	10.6	17.0	480	270	763	19.2	10.0	197	2.6	2.3	5.0	38.3	1.0	153
Bi	2.83	0.39	0.15	0.23	3.65	6.10	8.26	0.17	0.14	0.46	0.11	0.30	0.35	0.99	0.07	1.88
Th	3.3	6.7	4.0	6.6	0.1	2.4	2.7	5.0	5.1	3.8	4.9	6.7	9.4	5.8	4.0	2.3
U	4.1	2.3	2.6	3.4	8.4	10.5	7.7	8.2	4.7	41.6	9.2	4.1	6.3	5.3	1.9	3.1

Таблица 6. Содержание редкоземельных элементов (мкг/г) в осадках из скважины 858В, Срединная Долина, хребет Хуан де Фука

Образец	Скважина	Керн-секция, интервал (см)	Толща	Глубина, м	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
2182	858В	1Н-5, 14–18	I	6.14	21.5	46.2	5.0	20.2	4.3	1.0	4.0	0.60	3.5	0.70	2.1	0.3	2.1	0.33
ZT-46A	858В	2Н-2, 50–53	I	9.20	19.2	37.2	4.4	18.4	4.1	1.4	4.2	0.64	3.9	0.84	2.1	0.3	1.9	0.29
2951	858В	2Н-4, 131–133	I	13.01	15.0	30.9	3.6	13.0	2.5	0.4	2.1	0.30	1.7	0.40	1.1	0.2	1.2	0.18
2952	858В	2Н-5, 47–52	I	13.67	10.7	21.7	2.6	9.8	2.3	0.4	2.0	0.32	1.9	0.41	1.1	0.2	1.2	0.19
2184	858В	2Н-6, 69–71	I	15.39	9.5	23.9	2.8	11.4	2.7	0.3	2.6	0.40	2.4	0.50	1.6	0.2	1.6	0.25
3110	858В	3Н-1, 118–123	I	17.88	15.7	30.1	3.6	15.5	3.4	0.3	3.3	0.51	3.1	0.62	1.8	0.2	1.6	0.24
2185	858В	5Н-3, 21–24	IIВ	27.11	15.9	42.4	4.9	19.6	4.0	0.1	3.2	0.49	2.7	0.55	1.5	0.2	1.5	0.22
KB-5Н	858В	5Н-4, 14–18	IIВ	28.54	16.8	41.9	5.2	21.4	4.4	0.1	3.4	0.52	3.0	0.57	1.7	0.2	1.6	0.23
2186	858В	5Н-4, 27–29	IIВ	28.67	24.6	54.3	6.1	23.3	4.5	0.1	4.1	0.60	3.4	0.70	2.1	0.3	2.0	0.28
2953	858В	6Н-1, 6–8	IIВ	31.55	8.2	16.2	2.7	11.3	2.7	0.2	2.6	0.40	2.2	0.50	1.4	0.2	1.3	0.17
2187	858В	8Х-1, 13–15	IID	32.83	7.3	19.6	2.6	10.2	2.1	0.1	1.9	0.30	1.5	0.30	1.0	0.1	0.9	0.13
2954	858В	8Х-5, 10–14	IID	37.80	5.4	10.8	1.3	5.3	1.3	0.1	1.2	0.20	1.1	0.20	0.7	0.1	0.7	0.10
2955	858В	9Х-5, СС, 7–12	IID	38.37	3.1	11.6	1.8	8.0	2.0	0.1	1.8	0.29	1.8	0.37	0.98	0.2	0.9	0.13
2949	858В	1Н-1, 57–61	III	0.57	10.8	20.6	2.6	10.1	2.2	0.5	2.1	0.30	1.9	0.40	1.2	0.2	1.1	0.18
2950	858В	2Н-3, 85–88	IV	11.05	0.8	1.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.00	0.1	0.00	0.1	0.0	0.0	0.01
2183	858В	2Н-4, 62–64	IV	12.32	5.4	9.1	1.1	4.2	0.9	0.7	0.9	0.10	0.7	0.20	0.5	0.1	0.5	0.08
ZT-47	858В	2Н-4, 96–98	IV	12.66	8.6	18.4	2.3	9.9	2.1	0.8	2.2	0.34	2.1	0.44	1.3	0.2	1.3	0.19



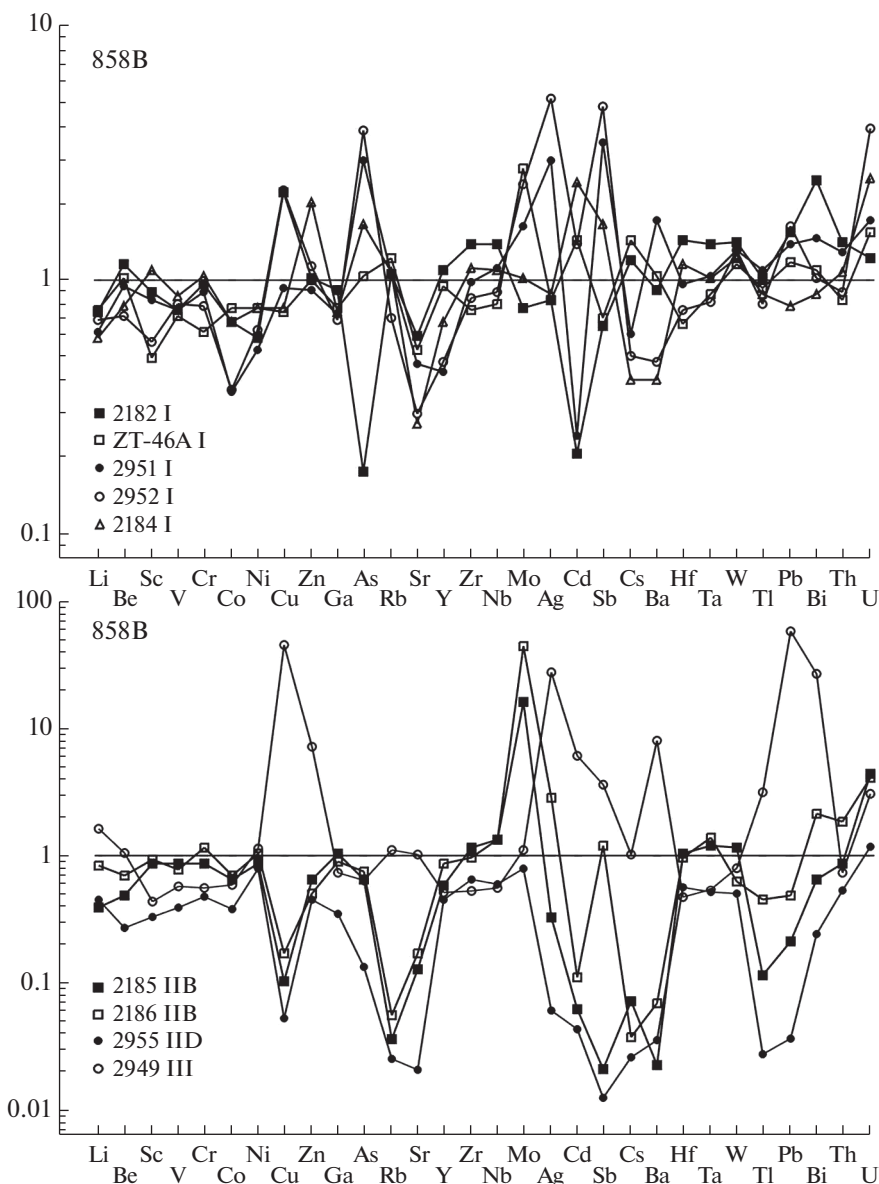
**Рис. 5.** Состав и содержание макроэлементов в гидротермально измененных осадках скважины 858В, нормированный на состав неизмененных осадков из скважин 855А, С, D.

Содержание РЗЭ в этих осадках практически не изменилось (рис. 7). Очевидно, условия в осадках верхней части Толщи I, при которых произошло заметное изменение содержания отдельных макроэлементов и микроэлементов, были недостаточны для того, чтобы затронуть содержания РЗЭ.

Слабое изменение или отсутствие изменений в содержании большинства химических элементов в осадках верхней части Толщи I в целом соответствует относительно низкой температуре в этой части разреза. Она составляет около 17°C и была рассчитана, исходя из вертикального температур-

ного градиента [Сахаров, Курносов, 2022], который в скважине 858В составляет 10–11°C/м [Frü-Green et al., 1994; Buatier et al., 1995].

Детальное изучение глинистых минералов из этого интервала осадочного разреза показало, что исходные терригенные глинистые минералы сохранились без изменения. В то же время установлено небольшое количество новообразованного триоктаэдрического смешанослойного хлорит-сметита [Сахаров, Курносов, 2022]. В валовых образцах, изученных методами рентгеновской дифрактометрии, обнаружены в нижней части этого интервала в небольшом количестве



**Рис. 6.** Состав и содержание микроэлементов в гидротермально измененных осадках скважины 858В, нормированный на состав неизмененных осадков из скважин 855А, С, D.

ангидрит и пирит; в результате изучения фракции 0.1–0.5 мм в иммерсионных жидкостях, найдены рассеянные кристаллы барита (около 3%) [Kurnosov et al., 1994].

Таким образом, осадки верхней части Толщи I в основном не изменены. В то же время, преобразование содержаний отдельных макроэлементов и микроэлементов в них и появление небольшого количества аутигенных минералов (триоктаэдрического смешанослойного хлорит-сметита, ангидрита, пирита, барита) указывают на то, что осадки претерпели ограниченное изменение.

В осадках нижней части Тоши I (12.70–25.31 м, образцы 2951, 2952, 2184) произошло дальнейшее

изменение содержания части макроэлементов (см. рис. 5). Значительно возросло содержание Mn (обр. 2951) и S (обр. 2951 и 2952) и заметно уменьшилось во всех образцах содержание Ca. Уменьшилось также содержание K, а в обр. 2951 и 2184 уменьшилось содержание I. Содержание P и Vg уменьшилось в обр. 2951 и 2952. Содержание остальных макроэлементов в основном или осталось без изменения, или слабо уменьшилось.

Во всех образцах осадков нижней части Толщи I произошло заметное уменьшение содержания Co, Sr, Y, Cs, а содержание As, Sb, U, напротив, сильно увеличилось (см. рис. 6). Существенно уменьшилось содержание Cd в обр. 2951 при уве-

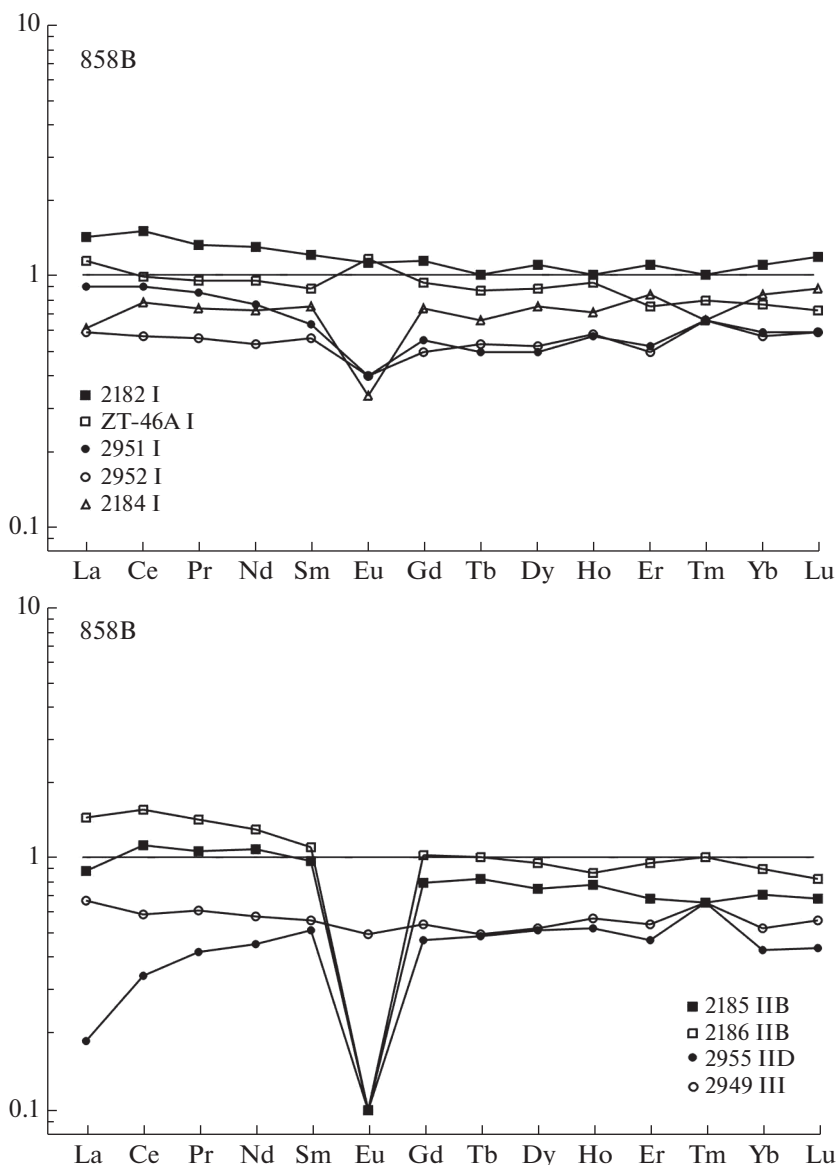


Рис. 7. Состав и содержание редкоземельных элементов в гидротермально измененных осадках скважины 858В, нормированный на состав неизменных осадков из скважин 855А, С, D.

личившемся его содержанию в обр. 2952 и 2184. Содержание Cu (обр. 2952), Zn (обр. 2184), Mo и Ag (обр. 2951 и 2952) заметно увеличилось. Содержание остальных микроэлементов почти не изменилось или осталось без изменения. По сравнению с изменениями содержания микроэлементов в осадках верхней части Толщи I, в нижней части этой толщи количество микроэлементов, содержание которых изменилось по сравнению с их содержанием в неизменных фоновых осадках, увеличилось. Степень этих изменений заметно усилилась. Поэтому, если осадки из верхней части Толщи I несут в себе некоторые признаки начальных изменений, то в осадках нижней части

Толщи I произошло очевидное перераспределение микроэлементов.

Во всех изученных образцах осадков нижней части Толщи I произошло в разной степени относительно небольшое уменьшение содержания РЗЭ по сравнению с их содержанием в неизменных фоновых осадках (см. рис. 7). Кроме того, в них образовалась небольшая отрицательная Eu аномалия.

Высокий уровень изменения содержаний целого ряда химических элементов в осадках нижней части Толщи I соответствует температурному режиму в этой части разреза осадков в данной скважине. Температура на глубине около 16 м, рассчитанная по температурному градиенту в сква-

жине 858В, составляет около 112°C [Сахаров, Курносов, 2022]. В скважине на глубине 19.5 м инструментально замерена температура 197°C [Davis et al., 1992].

Значительное изменение химического состава сопряжено с изменением глинистых минералов в осадках нижней части Толщи I. Терригенные диоктаэдрические глинистые минералы здесь преобразованы в триоктаэдрические фазы: в смешанослойный хлорит-сметит (15%) и корренситовый минерал (<1%) [Сахаров, Курносов, 2022].

В процессе взаимодействия раствор–осадки сильное увеличение в этих осадках содержания Mn (обр. 2951), S, As, Sb, U, а также Cd в обр. 2952 и 2184, Cu (обр. 2952), Zn (обр. 2184), Mo и Ag (обр. 2951 и 2952) сопровождается обеднением раствора этими элементами. А уменьшение в них содержания Ca, P, I, Br, Co, Sr, Y, Cs, Eu, а также Cd в обр. 2951 – обогащением ими раствора.

Пестрота в изменении содержания части химических элементов в разных образцах осадков предположительно связана с горизонтальными потоками растворов. Они нарушают закономерную вертикальную зональность изменения содержаний химических элементов, которая неминуема в гидротермальных системах, особенно в данном случае, когда осадочный разрез состоит из довольно однообразных глинистых осадков. Существование горизонтальных потоков растворов в гидротермальной системе в Срединной Долине хребта Хуан де Фука было подчеркнуто участниками рейса 139 ODP [Davis et al., 1992]. Эти потоки показаны на моделях океанской гидротермальной системы в Срединной Долине (см. рис. 3, 4).

Осадки всей Толщи I в разной степени изменены: от слабого изменения в ее верхней части в низкотемпературных условиях до хорошо выраженного изменения в нижней части Толщи I в среднетемпературных условиях. Таким образом, осадки из верхней части разреза (скв. 858В), из интервала 1.97–25.31 м, отнесенные участниками рейса 139 ODP к неизменным отложениям, по геохимическим данным и результатам детального изучения глинистых минералов, к таковым относятся только частично.

Толща IIВ (25.31–31.83 м, образцы 2185 и 2186). В осадках Толщи IIВ произошло более сильное изменение содержания макроэлементов по сравнению с их изменением в осадках нижней части Толщи I (см. рис. 5). Значительно сильнее в осадках Толщи IIВ уменьшились концентрации K и P. В этих осадках сильно увеличилось содержание Mg, а в обр. 2186 сильно возросло содержание I. Практически неподвижными в обр. 2186 остались Si, Ti, Al, Fe, S.

В этих осадках содержание Cu, Rb, Sr, Cd, Cs, Ba сильно уменьшилось, а Mo и U сильно увели-

чилось по сравнению с их содержанием в неизменных фоновых осадках (см. рис. 6). В разных образцах содержание Li, Be, Co, Zn, As, Y, W слабо сократилось или осталось без изменения. Содержание остальных микроэлементов (Sc, V, Cr, Ni, Ga, Zr, Nb, Hf, Ta) в этих осадках не изменилось.

В осадках Толщи IIВ, по сравнению с осадками нижней части Толщи I, уменьшилось количество микроэлементов, содержание которых заметно увеличилось. В то же время, значительно возросло количество микроэлементов, для которых произошло сильное уменьшение их содержания в осадках Толщи IIВ. Это указывает на то, что в процессе взаимодействия раствор–осадки, в условиях увеличения температуры вниз по разрезу, в вышележащих осадках нижней части Толщи I значительно чаще проявлен привнос микроэлементов из раствора в осадки, чем их вынос из осадков в раствор. В осадках Толщи IIВ, напротив, чаще проявлен вынос микроэлементов из осадков в раствор, чем их привнос из раствора в осадки.

В осадках Толщи IIВ содержание PЗЭ не изменилось или слабо изменилось, кроме Eu (см. рис. 7). В этих осадках появилась хорошо выраженная отрицательная Eu-аномалия.

Сильное изменение содержания целого ряда химических элементов в осадках Толщи IIВ произошло в условиях возрастания температуры примерно до 240–265°C [Frü-Green et al., 1994; Buatier et al., 1995]. При этой температуре произошла также дальнейшая перестройка терригенных глинистых минералов. Сформировался корренсит и смешанослойный тальк-сметит [Сахаров, Курносов, 2022]. По-видимому, есть связь перераспределения макроэлементов и микроэлементов в осадках и перестройкой фазового состава глинистых минералов в процессе взаимодействия раствор–осадки.

В среднетемпературных гидротермальных условиях произошло наиболее существенное обогащение раствора K, P, Cu, Rb, Sr, Cd, Cs, Ba в результате их потери осадками в процессе взаимодействия раствор–осадки, и обогащение осадков Mo и U в результате их потери раствором в этом процессе. Возможно, что раствор обогатился Eu при его потере осадками.

Толща IID (31.83–38.60 м, образец 2955). В осадках Толщи IID уменьшилось содержание Ca, Na, S, Br сильнее, чем в осадках Толщи IIВ (см. рис. 5). Уменьшение содержания K и P – такое же заметное, как и в осадках Толщи IIВ. В этих осадках существенно увеличилось содержание Mg. Содержание Si, Ti, Al, Fe<sub>total</sub>, Mn, F, I не изменилось или слабо уменьшилось по сравнению с содержанием этих элементов в неизменных фоновых осадках.



В осадках Толщи IID уровень содержания всех микроэлементов ниже, чем в неизмененных фоновых осадках, за исключением Ni и U, содержание которых не изменилось (см. рис. 6). Общая картина изменений содержания для большинства микроэлементов в осадках Тоши IID и Толщи IIB похожа. В то же время, в осадках Толщи IID произошло уменьшение их содержания сильнее, чем в осадках Толщи IIB. Кроме того, в осадках Толщи IID нет микроэлементов, содержание которых выше, чем в неизмененных фоновых осадках. Содержание всех PЗЭ в этих осадках уменьшилось в отличие от осадков Толщи IIB, в которых содержание PЗЭ осталось практически без изменения, кроме Eu. Сильная отрицательная Eu-аномалия одинаково проявлена в осадках Толщ IID и IIB (см. рис. 7).

Интенсивное перераспределение химических элементов произошло в высокотемпературных условиях. В нижней части разреза осадков, вскрытого скв. 858В до глубины 38.6 м, температура достигает 320°C и выше [Frü-Green et al., 1994; Buatier et al., 1995; Сахаров, Курносов, 2022]. В осадках Толщи IID в соответствии с этой температурой произошла полная перестройка исходных терригенных глинистых минералов в хорошо окристаллизованный хлорит [Сахаров, Курносов, 2022].

В осадках Толщи IID увеличилось только содержание Mg. Соответственно раствор обеднел этим элементом. Уменьшение в осадках содержания Ca, Na, K, P, S, Br, а также всех изученных микроэлементов и PЗЭ сопровождается обогащением этими элементами раствора в процессе взаимодействия раствор—осадки.

Можно предположить, что в более глубоких горизонтах осадочного разреза в районе расположения скв. 858В, где температура может достигать 400°C и выше, процесс обмена химическими элементами при взаимодействии раствора с осадками такой как в Толщах IIB и IID. К основанию осадочного покрова в условиях дальнейшего роста температуры этот процесс может проходить еще более интенсивно.

Толща III. Металлоносные осадки (0–1.97 м, образец 2949). Содержание химических элементов в металлоносных осадках целесообразно сравнивать с химическим составом наименее измененных гемипелагических осадков верхней части Толщи I, т.к. участники рейса 139 ODP показали, что основу осадков Толщи III составляет гемипелагическая глина. В этих осадках содержание Si осталось без изменения по сравнению с содержанием Si в неизмененных фоновых осадках и в гемипелагических осадках Толщи I (обр. 2182). Слабое уменьшение содержания Ti, Al, Fe<sub>total</sub> такое, как в обр. 2182 из Толщи I. Содержание K и P существенно меньше, чем в неизмененных фоновых

осадках и в гемипелагических осадках (обр. 2182). Содержание Ca уменьшилось по сравнению с его содержанием в обр. 2182. Содержание Mg больше, чем в фоновых осадках и аналогично уровню содержания Mg в гемипелагических осадках Толщи I (обр. 2182). Содержание Mn и особенно I и Br больше, чем в фоновых осадках, а также в гемипелагических осадках Толщи I (обр. 2182). Содержание Na и S осталось без изменений по сравнению с фоновыми осадками (напротив, в обр. 2182 из гемипелагических осадков Толщи I содержание Na меньше). Содержание F немного больше, чем в фоновых осадках.

В металлоносных осадках содержание Cu, Zn, Ag, Cd, Sb, Ba, Tl, Pb, Bi, U по сравнению с осадками Толщи I (обр. 2182) значительно более высокое. Это отражает присутствие в них рудной составляющей, связанной с металлоносным гидротермальным раствором, который разгружается на дне в виде “черного курильщика” в 20 м от места, где пробурена скважина 858В.

В металлоносных осадках нет Eu-аномалии так же, как в осадках из верхней части Толщи I (образцы 2182, ZT-46A). Содержание остальных PЗЭ аналогично их содержанию в обр. 2952 (Толща I), а содержание Sm и элементов от Gd до Lu практически совпадает с их содержанием в обр. 2955 (Толща IID).

Такое содержание макроэлементов, микроэлементов, PЗЭ согласуется с представлением, что металлоносные осадки из скважины 858В являются смесью гемипелагических осадков с металлосодержащими образованиями, которые сформировались в результате взаимодействия с морской водой гидротермального флюида, изливающегося на дне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что изменение химического состава осадков в процессе взаимодействия раствор—порода произошло в условиях быстрого роста температуры вниз по разрезу от 17°C до 332°C и выше следующим образом. В Толще I, в верхней ее части (1.97–10.41 м), осадки слабо изменены при температуре около 17°C. В нижней части Толщи I (12.70–25.31 м) в условиях средней температуры (112–197°C) изменение содержания макроэлементов и микроэлементов хорошо выражено. Наиболее сильно изменен химический состав осадков Толщ IIB и IID (25.31–38.6 м) в температурном диапазоне от 112–197°C до 320–330°C и выше. Изменение содержания для большинства макроэлементов и микроэлементов в осадках Толщи IIB и Толщи IID близки, но с тем отличием, что в осадках Толщи IID уменьшение содержания химических элементов проявлено сильнее. В осад-

ках этих двух толщ содержание всех микроэлементов (Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, Tl, Bi), кроме U, существенно меньше, чем в неизменных фоновых осадках. В осадках Толщи IID Eu аномалия проявилась также сильно, как в осадках Толщи IIB. В осадках Толщи IID так же, как и в осадках Толщи IIB, ниже содержание Ca, Na, K, P и выше содержание Mg. Меньшее содержание макроэлементов и микроэлементов в этих осадках, по сравнению с их содержанием в фоновых осадках можно рассматривать, как результат выноса из осадков химических элементов в процессе взаимодействия раствор—осадки, а увеличение их содержания — как их привнос в осадки из раствора и, соответственно, обогащение/обеднение этими элементами раствора. Приведены результаты изучения химического состава металлоносных осадков (Толща III, 0–1.97 м) и сульфидной Толщи IV (10.41–12.70 м).

Таким образом, изучены в недрах океанской высокотемпературной гидротермальной системы изменения химического состава осадков из ключевой скважины 858В, пробуренной рядом с “черным курильщиком” на гидротермальном поле “Dead Dog” в Срединной Долине хребта Хуан де Фука. На основе этих результатов показано влияние осадочного покрова на изменение состава раствора. Полученные данные являются важными для изучения в гидротермальных системах изменений вещественного состава осадков, перекрывающих спрединговые рифты в океане, в которых пробурены или будут пробурены скважины. Кроме того, эти результаты — основа для дальнейшего исследования изменений химического состава осадков из скважины 858В, направленного на выяснение механизмов этих изменений на минерально-геохимическом уровне с изучением химического состава терригенных и новообразованных минералов, прежде всего глинистых минералов, методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

Можно предположить, что в более глубоких горизонтах осадочного разреза в районе расположения скважины 858В, где температура может достигать 400°C и выше, процесс обмена химическими элементами при взаимодействии раствора с осадками такой как в Толщах IIB и IID. К основанию осадочного покрова в условиях дальнейшего роста температуры этот процесс может проходить еще более интенсивно.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

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

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного плана научно-исследовательских работ по теме № 122011800645-0.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Сахаров Б.А., Курносков 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.
- Buatier M.D., Gretchen L. Früh-Green, Anne-Marie Karpoff.* Mechanisms of Mg-phyllsilicate formation in a hydrothermal system at a sedimented ridge (Middle Valley, Juan de Fuca) // Contrib. Mineral. Petrol. 1995. V. 122. P. 134–151.
- 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. Init. Repts, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1992. P. 9–41.
- Früh-Green G.L., McKenzie J.A., Boni M., Karpoff A.M., Buatier M.* 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., Franklin J.M.* Geology. Mineralogy and geochemistry of massive sulfides in shallow cores, Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge // Econ. Geol. 1993. V. 88. P. 2037–2068.
- 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.
- 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.
- Zierenberg R.A., Koski R.A., Morton J.I. et al.* Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center? Escanaba Trough, 41° N, Gorda Ridge // Econ. Geol. 1993. V. 88. P. 2069–2098.

## Chemical Composition of Sediments and Its Changes in the Center of the Modern Hydrothermal System in the Middle Valley of the Oceanic Ridge Juan de Fuca, Hole 858B ODP

V. B. Kurnosov<sup>1, \*</sup>, Yu. I. Konovalov<sup>1</sup>, K. R. Galin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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 a study of changes in the chemical composition of Pleistocene sediments from Hole 858B, 38.6 m deep with a temperature gradient of 10–11°C/m, drilled in the Middle Valley of the Juan de Fuca oceanic ridge (Northeast Pacific) in the “Dead Dog” hydrothermal field, in 20 m from “black smoker” with a temperature of 276°C. The content of petrogenic elements in these sediments was studied by XRD. For the first time, data on a large set of trace elements were obtained for this object using the ICP MS method. The change in the chemical composition of sediments occurred in the process of solution-rock interaction under conditions of a rapid increase in temperature downwards the section. In the Unit I, in its upper part (1.97–10.41 m), the sediments are slightly altered at a temperature of about 17°C. In the lower part of the Unit I (12.70–25.31 m) under conditions of average temperature (112–197°C), the change in the content of petrogenic elements and trace elements is well pronounced. The chemical composition of the sediments of the Unit IIB and the Unit IID (25.31–38.6 m) is most strongly changed in the temperature range from 112–197°C to 320–330°C. Changes in the content for most macroelements and trace elements in the sediments of Unit IIB and Unit IID are similar, with the difference that the decrease in the content of chemical elements is more pronounced in the sediments of the Unit IID. In them, the content of Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, Tl, Bi, except for U, is significantly lower than in background sediments. The sediments of the the IID, as well as the sediments of the Unit IIB, contain less Ca, Na, K, P and more Mg. A lower content of chemical in these sediments can be considered as their removal from sediments under the process of solution-sediments interaction and enrichment of the solution with them, and their higher content, as its introduction into sediments from solution and, accordingly, depletion of these chemical elements in the solution. The results of studying the chemical composition of metalliferous sediments (Unit III, 0–1.97 m) and sulfide layer IV (10.41–12.70 m), as well as the chemical composition of unaltered background sediments from Holes 855A, C, D are presented.

*Keywords:* hydrothermal system, Juan de Fuca oceanic ridge, hydrothermal changes in sediments, redistribution of chemical elements, deep-sea drilling.