

УДК 551

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОСАДКОВ В ЗОНАХ КОНТАКТА С БАЗАЛЬТОВЫМИ СИЛЛАМИ, ВПАДИНА ГУАЙМАС, КАЛИФОРНИЙСКИЙ ЗАЛИВ (скважина DSDP 478)

© 2022 г. Е. О. Гончаров^{1, *}, В. Б. Курносов^{1, **}, Ю. И. Коновалов^{1, ***}

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

*e-mail: evgeniigonch91@gmail.com

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

***e-mail: yukonov@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2021 г.

После доработки 08.04.2021 г.

Принята к публикации 30.09.2021 г.

На примере впадины Гуаймас Калифорнийского залива (скважина DSDP 478) показано изменение химического состава верхнеплейстоценовых осадков в специфичных кратковременных гидротермальных системах, которые возникают при внедрении базальтовых силлов в нелитифицированные холодные высокопористые осадки с морской водой. Изменение химического состава осадков (турбидитов, переслаивающихся с гемипелагическими осадками) в зонах контакта с базальтовыми силлами во впадине Гуаймас Калифорнийского залива изучено методами рентгено-флюоресцентного анализа (РФА) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS).

Ключевые слова: впадина Гуаймас, Калифорнийский залив, осадки, базальтовые силлы, гидротермальные системы

DOI: 10.31857/S0030157422050045

ВВЕДЕНИЕ

Во впадине Гуаймас Калифорнийского залива в верхнеплейстоценовые нелитифицированные осадки внедрялись базальтовые силлы разной мощности [4]. Внедрение силлов в осадочный покров сопровождалось формированием кратковременных гидротермальных систем, в которых происходило изменение вмещающих осадков при их взаимодействии с разогретой поровой морской водой. Выделила этот тип гидротермальных систем в срединно-океанических хребтах, расположенных около континентов и перерывных осадочным чехлом, М. Кастнер [6] при изучении осадков из глубоководных скважин, пробуренных во впадине Гуаймас Калифорнийского залива. Целенаправленное изучение изменения содержания макроэлементов и микроэлементов в осадках при тепловом воздействии на них силлов из скважин 477, 478, 481А было предпринято Нимицем [10]. По этим осадкам им был проведен силикатный анализ, из микроэлементов было изучено содержание в осадках только Со, Ст, Си, Ni, V, Zn. Последующее исследование изменения химического состава осадков было проведено нами для осадков из скважины 477 (южный трог впадины Гуаймас) [1, 3] и из скважины 481А (северный

трог впадины Гуаймас) [2]. В этих работах был существенно расширен спектр изученных микроэлементов благодаря применению метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Изучение осадков из скважины 478 завершает изучение изменения химического состава плейстоценовых осадков под влиянием различных по мощности базальтовых силлов во впадине Гуаймас.

Данная статья направлена на изучение изменения химического состава осадков из скважины 478. В скважине 478 обнаружен комплекс силлов мощностью ~120 м, включающий, по-видимому, в свой состав силл мощностью в первые метры [4], который венчает этот комплекс, в отличие от комплекса силлов из скважины 477 мощностью 47 м, в котором силл мощностью ~4 м находится в подошве комплекса. Кроме того, в скважине 478 находится индивидуальный базальтовый силл мощностью ~3 м, не входящий в комплекс силлов большой мощности [4].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Впадина Гуаймас расположена в главной разломной зоне Калифорнийского залива, состоящей из системы осей спрединга и трансформных

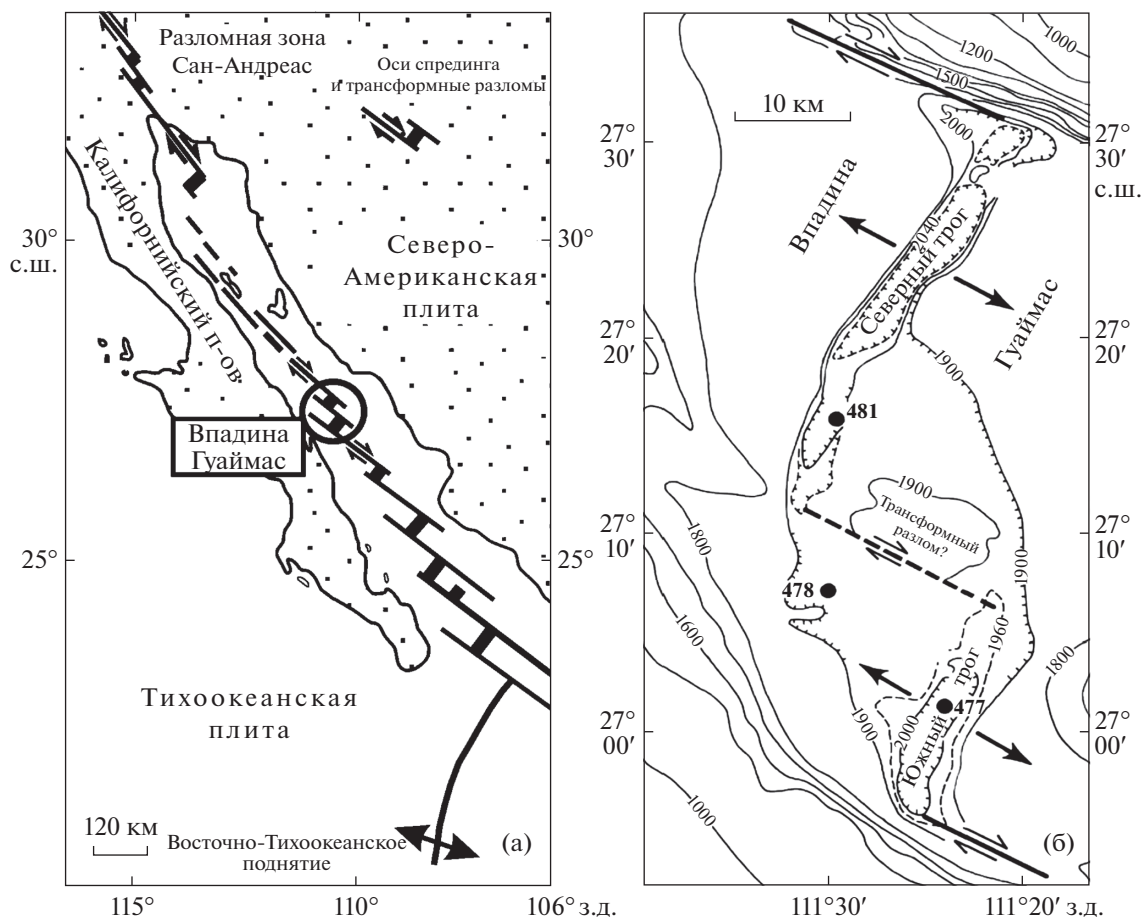


Рис. 1. Структурная схема Калифорнийского залива (а) и расположение скважин глубоководного бурения во впадине Гуаймас (б); стрелки показывают направление движения плит (по [8]).

разломов [9], продолжающей Восточно-Тихоокеанское поднятие и переходящей на Северо-Американском континенте в зону разломов Сан-Андреас (рис. 1а). Во впадине накапливались с большой скоростью (около 1200 м/млн лет) верхнеплейстоценовые осадки общей мощностью в несколько сотен метров, которые состоят из турбидитов, переслаивающихся с гемипелагическими осадками и диатомовыми илами [4].

Во впадине Гуаймас находятся южный и северный трого, представляющие собой спрединговые центры, разделенные трансформными разломами. Это депрессии шириной 3–4 км и глубиной 2000 м. Северный трог протягивается на 35 км (в нем пробурена скважина 481А), южный — на 25 км (в нем пробурена скважина 477). Между трогоми расположена скважина 478 (рис. 1б) глубиной 464 м. В скважине 478 в осадочном покрове находится комплекс базальтовых силлов мощностью ~120 м и индивидуальный силл мощностью ~3 м, не входящий в состав этого комплекса.

В районе скважины 478 замерен низкий тепловой поток, который составляет 153 мВт/м² [5, 7, 11].

Эта скважина пробурена за пределами действия основных долгоживущих гидротермальных систем, что позволяет продолжить изучение изменений химического состава осадков под влиянием теплового воздействия на них силлов разной мощности.

М. Кастнер [6] по петрографическим данным выделила в скважине 478 минеральные зоны неизмененных осадков и зоны, в которых осадки изменены под тепловым воздействием силлов. Неизмененные осадки (интервалы 0 – ~185, 247–250, 259 – ~290 м) состоят из смеси терригенных кварца, плагиоклаза, небольшого количества калиевого полевого шпата, глинистых минералов, опала-А, кальцита. Термально измененные зоны установлены в интервалах 185 – ~215, 240 – ~247, 250 – ~253, 256.5 – ~259, 290–339 м. В этих зонах исчезли диатомовые и клиноптилолит. В них присутствует небольшое количество новообразованного кварца в смеси с терригенным кварцем. Кроме кварца, в этих осадках установлено наличие опала С-Т, пирита и гипса. В измененных осадках иногда встречается в разных количествах

доломит. В осадках из зон непосредственного контакта с силами кварц представлен смесью терригенного и новообразованного кварца.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение содержания макроэлементов (оксидов) в валовых образцах осадков проведено методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в Лаборатории химико-аналитических исследований Геологического института РАН (г. Москва). Совместно с РФА использованы методы “мокрой” химии, прежде всего, для раздельного определения Fe₂O₃ и FeO. Другие методы аналитической химии были применены для определения содержания в осадках CO₂, C_{орг}, H₂O⁻. Содержание микроэлементов, включая редкоземельные элементы (РЗЭ), определено в образцах осадков (пудры) с их разложением в автоклаве в Лаборатории ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав осадков из скважины 478 приведен в табл. 1, 2, 3. Результаты сравнения химического состава измененных и неизмененных осадков показаны на рисунках в виде спайдерграмм. Все образцы для репера (3103, 3104, 3105, 2725, 2727, 2742) взяты из неизмененных осадков из скважины 478.

Изменение состава осадков, вмещающих силл мощностью ~3 м

Над силлом, который находится в интервале 253.5–256.5 м, расположена зона измененных осадков в интервале 250–253.5 м [6]. Из этой зоны изучены в 2.5 м и 0.25 м выше кровли силла образцы 2736 (250.95 м) и 2737 (253.25 м), рис. 2. Под силлом расположена зона термально измененных осадков мощностью 2.5 м, которая находится в интервале 256.5–259 м. Из этой зоны изучены образцы 2739 (256.90 м) и 2741 (258.50 м), которые взяты в 0.4 и 2 м ниже подошвы силла (см. рис. 2).

В осадках над силлом заметные изменения содержания отдельных макроэлементов установлены в образце 2737, который находится на контакте с кровлей силла. В нем сильно уменьшилось содержание Mn, Ca и слабо уменьшилось содержание Al, K, одновременно увеличилось содержание Mg, Na (рис. 3а). Под силлом, в непосредственной близости к его подошве (образец 2739), в содержании макроэлементов произошло слабое

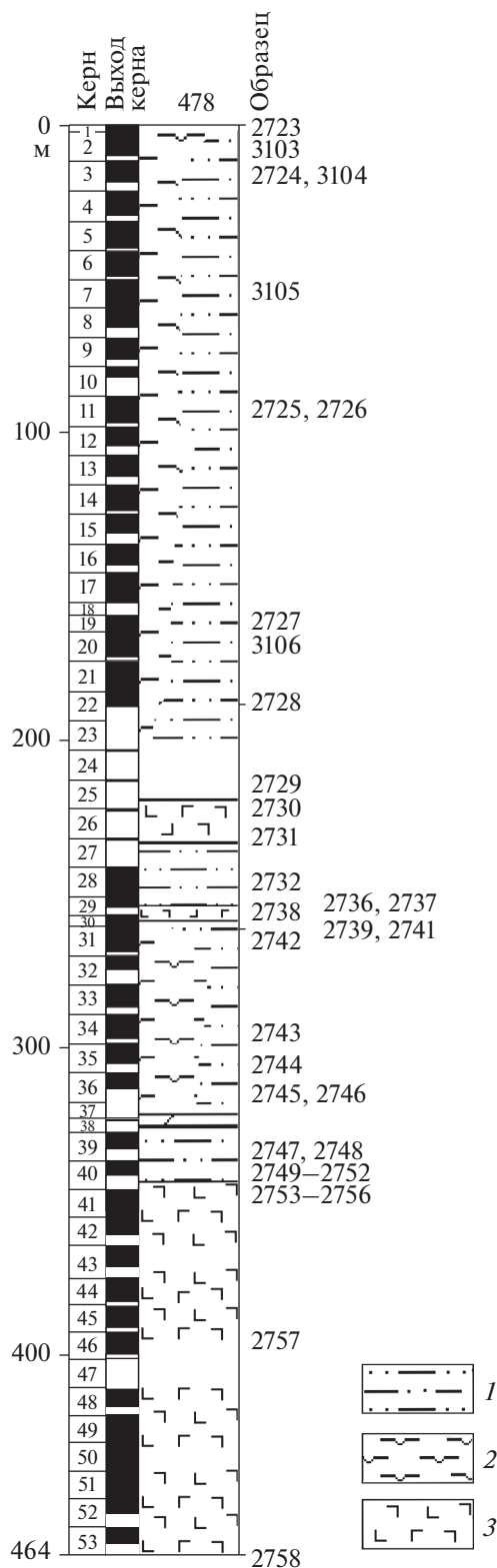


Рис. 2. Литологическая колонка скважины 478; зоны контактов силлов и осадков в керне 40 (секции 2 и 3) (по [4] с изменениями).

Таблица 1. Химический состав осадков из скважины 478, владина Гуаймас Калифорнийского залива, данные РФА (вес. %)

Образец	Керн-секция, интервал (см)	Глубина, м	Осадки	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	п.л.п.	Сумма	Cl	CO ₂	C _{орг}
2723	1R-1, 0-5	0	1	57.6	0.70	11.7	4.28	0.41	0.14	3.7	3.03	4.84	2.41	0.21	11.34	100.29	3.2	0.55	0.78
3103	2R-1, 50-54	4	1	62	0.55	13.03	3.63	0.42	0.16	3.17	2.17	2.83	2.46	0.11	8.51	99.04	0.73	0.80	0.29
2724	3R-3, 10-14	16.1	1	59.8	0.77	12.5	4.98	0.37	0.07	3.0	2.99	3.48	2.79	0.21	9.41	100.33	2.01	<0.2	0.73
3104	3R-3, 41-47	16.41	1	62.12	0.53	14.35	3.40	0.33	0.05	3.47	2.31	2.83	2.88	0.24	6.89	99.4	0.42	0.66	<0.1
3105	7R-6, 82-88	58.92	1	61.05	0.5	12.58	4	0.39	0.061	5.78	2.39	2.61	2.71	0.25	6.88	99.2	0.53	1.6	<0.1
2725	11R-3, 100-104	93	1	62.0	0.84	13.1	4.21	0.55	0.07	3.7	2.84	2.82	2.61	0.22	6.16	99.16	0.71	1.2	0.14
2726	11R-6, 35-40	96.45	1	69.4	0.29	6	2.43	0.37	0.19	4.4	1.33	2.83	1.35	0.11	11.46	100.13	2.72	1.3	0.68
2727	19R-3, 100-104	163.5	1	61.2	0.68	12.4	4.70	0.30	0.16	3.6	2.99	2.29	2.42	0.20	8.8	99.75	1.1	1.7	0.84
3106	20R-4, 95-100	170.75	1	58.85	0.50	11.98	3.25	0.86	0.05	5.68	3.08	3.18	2.56	0.28	8.41	98.68	1.07	3.28	<0.1
2728	22R-3, 105-110	187.95	2	60.5	0.48	11.0	3.67	0.30	0.25	6.1	1.86	3.03	2.05	0.19	11.03	100.36	1.7	3.6	0.98
2729	25R-CC, 10-12	212.6	2	12.9	0.090	2.2	0.66	0.43	0.10	24.9	18.1	0.34	0.48	0.13	39.69	100.03	0.11	39	<0.1
2732	28R-1, 15-19	242.65	3	61.3	0.48	9.9	3.64	0.45	0.45	5.6	2.19	2.25	2	0.16	11.55	99.96	1.58	2.7	1.36
2736	29R-1, 45-49	250.95	2	61.4	0.55	10.3	3.69	0.37	0.11	4.7	2.51	2.51	1.96	0.25	12.02	100.37	1.46	2.6	-
2737	29R-2, 125-129	253.25	2	69	0.58	10.1	4.31	0.22	0.05	1.87	3.13	3.37	1.91	0.21	5	99.56	0.76	0.55	-
2739	30R-1, 40-42	256.9	3	66.9	0.55	10.4	3.87	0.44	0.13	4.1	2.12	2.61	2.14	0.21	6.72	100.15	0.37	2.85	0.68
2741	30R-2, 50-54	258.5	3	63.26	0.54	9.27	3.50	0.67	0.33	5.41	2.59	1.72	1.98	0.21	10.48	99.95	0.81	4.8	0.91
2742	31R-1, 0-4	260	1	61.3	0.54	9.3	3.89	0.30	0.26	7.3	2.43	1.97	2.15	0.20	10.08	99.69	0.81	4.4	1.14
2743	34R-2, 70-74	290.7	2	61.5	0.42	9.6	3.41	0.38	0.17	6.8	1.94	2.21	1.88	0.16	11.47	99.85	1.21	3.55	1.22
2744	35R-1, 130-135	299.3	2	61.6	0.40	9.1	3.13	0.33	0.19	7.6	1.77	1.74	1.71	0.16	11.88	99.63	1.43	<0.2	0.74
2745	36R-1, 115-120	308.65	2	61.6	0.64	13.3	4.17	0.30	0.08	3.0	2.20	2.72	2.42	0.16	9.52	100.1	1.08	4.65	1.21
2746	36R-2, 75-80	309.75	2	59.8	0.59	9.9	4.10	0.42	0.20	7.4	2.71	2.19	2.63	0.19	9.7	99.76	0.73	4.4	1.04
2747	39R-1, 70-74	327.2	2	64.3	0.40	9.5	3.07	0.33	0.29	7.4	1.89	2.18	1.81	0.18	9.01	100.29	0.85	0.6	0.89
2748	39R-3, 60-64	330	2	64.4	0.71	9.6	4.15	0.30	0.09	3.8	2.55	2.24	2.35	0.18	9.37	99.69	0.74	4.4	0.77
2749	40R-1, 13-17	336.13	2	63.8	0.33	7.9	2.53	0.36	0.74	6.9	4.07	1.44	1.39	0.09	9.91	99.37	0.57	1.45	<0.1
2750	40R-1, 125-129	337.25	2	63.3	0.78	11.6	4.35	0.22	0.31	6.7	2.06	3.77	0.88	0.28	4.74	99.01	0.36	<0.2	0.78
2751	40R-2, 50-54	337.9	2	66.6	0.71	11.9	4.08	0.11	0.1	1.02	2.17	1.99	3.05	0.17	8.05	99.93	0.14	<0.2	<0.1
2752	40R-2, 125-129	338.65	2	68.4	0.77	12.4	2.38	0.29	0.08	1.37	3.88	2.09	2.94	0.16	4.96	99.67	0.43	<0.2	<0.1
2754	40R-3, 2-5	338.92	4	13.2	0.22	4.4	2.63	1.03	0.45	21.1	21.3	0.51	0.05	0.17	34.51	99.64	0.43	31.3	<0.1

Примечание. 1 – неизменные осадки; 2, 3, 4 – термально измененные осадки; 2 – над силлом, 3 – под силлом, 4 – между силлами.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в осадках из скважины 478, впадина Гуаймас Калифорнийского залива, данные ICP-MS (мкг/г)

Образец	Осадки	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	Sb	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
2723	1	46.8	1.3	9.2	87.3	35.3	10.8	29.1	20	247	13.4	9.1	87.2	353	17.5	155	9.4	3.6	0.72	0.9	1.9	10.5	615	4.2	0.67	1.4	0.67	38.2	0.15	7.3	3.3
3103	1	48.9	1.3	7.7	98.1	35.4	9.3	21.6	18.1	78.7	14.1	8.9	93.7	419	20.5	167	11.7	4.5	0.2	0.66	3.2	8.9	668	5	0.91	1.5	0.86	29.4	0.13	10.3	3.5
2724	1	55.8	1.7	9.9	99.9	36.2	12.4	28.9	26.2	111	15.3	16	106	298	21.1	178	11.2	3.8	0.23	0.78	2.8	12.9	621	5.1	0.82	2	0.73	22.8	0.21	10.2	3.7
3104	1	48.7	1.4	7.4	74	21.4	8.9	18.3	17	66.9	14.9	10	104	430	20.4	164	11.9	1.9	0.14	0.42	2.8	9.6	709	5.1	0.97	1.7	0.79	18.6	0.14	11	2.9
3105	1	44.2	1.4	7.1	72.2	35.9	8.2	16.8	16	63.6	15.5	8.9	105	477	21.4	158	11.9	2.2	0.15	0.54	2.8	8.3	747	5.2	0.94	1.7	0.82	18.2	0.15	11.1	3.6
2725	1	45.8	1.5	8.9	90.1	35	9.9	22.2	23	92.3	15	12.2	104	354	21.1	142	11.8	2.7	0.24	0.75	2.8	9.9	852	3.9	0.7	1.9	0.68	27.8	0.16	8.7	3.1
2726	1	25.4	0.93	5	68.8	26.4	8.5	33.3	31.3	102	7.8	8	54	229	12.2	57.2	4.8	8.4	0.3	2.3	2.4	5.6	324	1.7	0.3	1.1	0.51	24.2	0.17	5	4.5
2727	1	47.5	1.5	8.7	101	33.8	10.1	28.1	30	107	14.1	14	103	288	20.7	127	10.3	5.5	0.27	1.4	2.8	11.3	572	3.5	0.63	1.6	0.7	31.2	0.23	9.4	3.9
3106	1	36.1	1.1	7.3	57	36.9	7.5	16.1	12.7	60.3	13.7	7.5	92.2	541	20.8	142	10.6	2.6	0.18	0.57	2.2	6.5	955	4.4	0.81	1.3	0.79	15.9	0.12	9.6	3.8
2728	2	34.2	1.3	7.3	86.7	36.1	9.9	36.1	32.8	112	11.4	6.3	81.2	334	17.9	94	7.2	4.9	0.41	1.4	2.1	7.9	530	2.7	0.45	1	0.53	33.6	0.19	7.1	5.3
2729	2	8.5	0.34	1.6	22.1	10.8	1.7	8.8	6.3	21.3	2.4	1	15	577	3.7	23.2	1.8	2.6	1.5	0.35	0.32	1.8	251	0.59	0.1	0.43	0.15	3.5	0.04	1.6	1
2732	3	31.4	1.2	7	102	36.5	12.4	50.3	44.5	128	11	8.2	79.5	280	16.3	89.3	7	8.9	0.53	1.4	3.5	9.3	429	2.5	0.45	1	0.51	25.9	0.22	6.8	5.1
2736	2	23.1	1.3	8.1	87.4	58.7	8.9	49.5	37.9	112	12.5	9.1	75	278	17.4	99.1	7.5	7.5	0.54	2.2	1.7	8.1	413	2.8	0.48	1	0.56	18	0.2	6.9	6.4
2737	2	15	1.6	9.1	98.9	72.5	10	42.1	54.6	48.5	14.2	0.7	58.6	222	17.3	102	8.4	10.8	0.63	0.58	2.1	3.2	542	3.1	0.62	1.1	0.38	11.3	0.13	7.8	5.2
2739	3	14.9	1.7	9	89.3	69.1	10.8	50.1	38.4	146	13.1	7.1	71.7	197	17.5	97.2	7.7	9	0.66	1.9	1.9	8.2	516	2.9	0.56	1.2	0.72	22.2	0.21	7.5	5.2
2741	3	29.2	1.4	8.6	90.5	68.8	11.5	50.7	41.6	136	13.1	8.7	76.5	286	16.6	94.9	7.2	5.8	0.53	2.1	2.3	8.6	456	2.8	0.54	1.1	0.55	20.9	0.21	6.9	5.2
2742	1	33.7	1.4	8.7	96	48	12.7	42.6	38.9	135	13.2	9.3	85.2	356	18.6	98.6	7.4	7.5	0.57	1.3	2.9	9.4	541	3	0.54	1	0.59	20.5	0.19	7.5	4.9
2743	2	29.1	1.3	7.5	119	51.4	15.4	55.9	46.8	168	12.1	8.1	77.2	336	15.4	89.2	6.3	10.9	1.1	3.1	5	8.7	493	2.6	0.47	0.92	0.7	33	0.23	6.7	6.3
2744	2	26.9	1.1	7.4	96.8	46.9	11.5	48.4	37.9	140	11.2	7.2	62.3	366	13.9	77.9	5.8	8.6	0.91	2.3	3.4	7.9	421	2.4	0.41	0.87	0.54	22.9	0.18	5.8	4.9
2745	2	34.1	1.8	9.3	129	53.8	12.3	36.3	35.7	138	15.7	11.7	93.9	249	22.1	112	8.6	4.4	0.34	0.54	4.4	12.2	758	3.5	0.91	1.1	0.65	20.7	0.2	8.1	3.4
2746	2	33.7	1.7	10	118	56.6	15.5	49.5	53.9	161	15.6	8.3	104	343	20.6	113	9.1	9.5	0.78	2.3	4.5	10.7	615	3.4	0.7	1.2	0.8	30.7	0.26	9.4	5.7
2747	2	18.5	1.3	6.8	107	42.9	12.1	41.6	39.6	122	10.7	5.9	71.3	340	15.4	92.6	6.5	13.6	0.75	2.1	3.1	7.7	474	2.6	0.46	0.94	0.66	21	0.19	7.8	6.8
2748	2	24.5	1.5	9.5	90.1	54.4	10.7	34	30.8	116	15	10.3	91.5	264	18.5	118	9.4	9.2	0.5	1.4	2.4	10.5	629	3.8	0.66	1.2	0.64	19.9	0.2	7.7	5.2
2749	2	21.3	1.1	5.8	120	35.3	9.6	42.7	34.2	121	8.8	8.2	39.8	142	13.7	66.3	5	15.6	0.65	2	3.2	3.3	374	2.2	0.35	0.77	0.4	21	0.16	4.9	8.6
2750	2	9.8	1.5	7.1	67.5	35.1	15.5	37.2	27.7	64.5	14.1	12.2	27.1	505	22.2	112	9.9	9.3	0.42	1.6	3.2	2.2	443	3.7	0.68	1.2	0.26	33.6	0.1	8.2	4.3
2751	2	12.4	1.6	9.6	107	61.4	9.4	29.9	31.1	76.2	16.2	16.7	93.3	169	16.6	127	9.9	9.4	0.44	0.84	3	5.6	766	4.2	0.7	1.3	0.61	22.6	0.21	8.3	6.2
2752	2	13.1	1.8	7.8	107	61.9	12.6	39.4	21.5	90.5	17.2	0.85	77.3	197	19.2	129	10.9	9	0.24	1	1.1	4.1	975	4.5	0.86	1.5	0.54	9.5	0.19	6.6	3.8
2754	4	9.6	0.75	3.2	30.5	17.5	4.4	13.3	6.6	30.8	4.3	0.12	0.77	138	6	37.9	2.7	2.4	0.12	0.38	0.49	0.2	47.7	1.1	0.17	0.45	0.02	7	0.05	1.9	1.4

Примечание. 1 — неизмененные осадки; 2, 3, 4 — термально измененные осадки; 2 — над силлом, 3 — под силлом, 4 — между силлами.

Таблица 3. Содержание РЗЭ в осадках из скважины 478, впадина Гуаймас

Образец	Осадки	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
2723	1	22.7	50.5	5.5	21.6	4.4	1.1	3.7	0.54	3.1	0.61	1.8	0.25	1.7	0.26
3103	1	26.5	51.9	6.3	24.5	4.8	1.2	4.6	0.68	3.9	0.79	2.4	0.34	2.3	0.35
2724	1	30.2	60.8	7.3	26	5.1	1.2	4.4	0.66	3.7	0.74	2.2	0.3	2.1	0.32
3104	1	27.6	55.6	6.4	25.5	4.8	1.2	4.6	0.66	4	0.79	2.4	0.35	2.4	0.37
3105	1	29.1	56.9	6.5	25.2	4.8	1.1	4.7	0.68	4.1	0.81	2.5	0.35	2.4	0.38
2725	1	28.9	57.9	6.4	25.4	4.9	1.2	4.5	0.66	3.7	0.74	2.1	0.3	2.1	0.3
2726	1	13	30.8	3.1	12.1	2.4	0.51	2.2	0.34	1.9	0.41	1.2	0.17	1.2	0.18
2727	1	28	59.1	6.3	24.8	4.9	1.1	4.4	0.65	3.6	0.73	2.1	0.3	2.1	0.31
3106	1	27.7	55.6	6.3	24.4	4.8	1.2	4.4	0.65	3.9	0.77	2.3	0.33	2.3	0.35
2728	2	19.2	46	4.5	18.2	3.6	0.8	3.4	0.5	2.9	0.59	1.8	0.25	1.7	0.27
2729	2	4.5	9.3	1	4	0.78	0.16	0.75	0.11	0.64	0.14	0.4	0.06	0.38	0.06
2732	3	18.9	47.3	4.5	18	3.5	0.77	3.3	0.48	2.8	0.58	1.7	0.24	1.6	0.25
2736	2	19.6	47	4.6	18.3	3.7	0.82	3.4	0.51	2.9	0.61	1.8	0.25	1.7	0.27
2737	2	25	51	5.3	21	4.1	0.9	3.5	0.6	3.1	0.6	1.9	0.3	1.9	0.3
2739	3	23.8	50.8	5.1	19.8	3.9	0.83	3.4	0.52	3.1	0.64	1.9	0.27	1.8	0.28
2741	3	22.4	49.3	4.8	18.5	3.7	0.8	3.2	0.5	2.9	0.6	1.8	0.26	1.7	0.27
2742	1	25.4	54.7	5.5	21.7	4.2	0.93	3.7	0.57	3.2	0.67	2	0.28	1.9	0.29
2743	2	18.9	42.7	4.6	17.7	3.5	0.72	3	0.47	2.7	0.57	1.7	0.23	1.6	0.24
2744	2	16.4	37.6	4	15.8	3.2	0.67	2.7	0.42	2.4	0.5	1.5	0.22	1.5	0.23
2745	2	29.2	61.1	7.1	28	5.7	1.2	4.9	0.76	4.3	0.82	2.5	0.33	2.3	0.33
2746	2	29.9	65.1	6.5	25.2	4.9	1.1	4.2	0.65	3.7	0.75	2.3	0.32	2.2	0.32
2747	2	18.9	48.3	4.5	17.6	3.4	0.72	3	0.46	2.7	0.55	1.7	0.24	1.6	0.25
2748	2	23.4	56	5.8	22.8	4.5	1	3.9	0.6	3.4	0.68	2	0.29	2	0.29
2749	2	16.4	37.3	3.7	14.5	2.8	0.78	2.5	0.39	2.3	0.45	1.4	0.2	1.4	0.21
2750	2	32.7	67.7	7.5	29.6	5.8	1.2	4.8	0.75	4.1	0.82	2.4	0.33	2.2	0.33
2751	2	29.4	58.6	6	23.1	4.4	0.93	3.6	0.56	3.1	0.61	1.8	0.26	1.8	0.27
2752	2	20.5	40.4	5.4	21.7	4.5	0.94	3.9	0.62	3.4	0.7	2.1	0.3	2	0.31
2754	4	6.9	14.2	1.6	6.4	1.3	0.32	1.2	0.18	1	0.22	0.64	0.09	0.6	0.09

Примечание. 1 – неизменные осадки; 2, 3, 4 – термально измененные осадки: 2 – над силлом, 3 – под силлом, 4 – между силлами.

изменение, которое выразилось в уменьшении содержания Al, Mg, K (см. рис. 3а).

Изменение содержания микроэлементов в осадках над силлом (образцы 2736, 2737) и под ним (образцы 2739, 2741) во многом похожи (рис. 4а).

В них увеличилось содержание Cr, Ni, Cu, Mo, Ag, U и уменьшилось содержание Li, а также слабо уменьшилось содержание Rb, Sr, Zr, Nb, Sb, Ba, Hf, Ta, W, Th. В образце 2737, который находится на кровле силла, дополнительно к перечисленным выше элементам уменьшилось содержание Zn, Cd, Cs, Tl, Pb, Bi, особенно сильно уменьшилось содержание As. Содержание РЗЭ слабо уменьшилось как в осадках над силлом, так и под ним (рис. 5а).

Силл мощностью ~3 м относительно быстро остыл и соответственно не оказал сильного воз-

действия на содержание макроэлементов во вмещающих осадках. Воздействие силла небольшой мощности проявилось в осадках, находящихся на контакте с его кровлей и затронуло в основном только Mn и Ca (уменьшилось их содержание) и в значительно меньшей степени коснулось Mg и Na (увеличилось их содержание). Слабое изменение содержания Al, K может относиться к аналитическим ошибкам, а также к трудностям точного подбора образцов осадков для репера из толщи, представленной турбидитами, переслаивающимися с гемипелагическими осадками. Потеря осадками Mn связана с растворением аморфного вещества, содержащего Mn, а Ca – с растворением кальцита. Небольшое увеличение в осадках содержания Mg и Na обеспечивала морская вода, которая участвовала в формировании глинистых минералов в процессе взаимодействия вода–порода. Под силлом, в образце 2739, который ото-

бран в 0.4 м ниже его подошвы, практически не произошло изменения содержания макроэлементов в осадках. Отсутствие влияния силла мощностью ~4 м на содержание макроэлементов в осадках под его подошвой наблюдалось также в скважине 477, пробуренной в южном трого впадины Гуаймас [1, 3].

Микроэлементы проявили большую подвижность, чем макроэлементы. В осадках, расположенных на кровле силла (образец 2737), уменьшение содержания многих микроэлементов, и особенно As, связано, по-видимому, с уменьшением содержания в этих осадках $C_{орг}$. Увеличение содержания других элементов, скорее всего, имеет отношение к формированию глинистых минералов. Поведение микроэлементов в осадках, расположенных под подошвой силла (образцы 2739 и 2741), в значительной мере аналогично их поведению в осадках, залегающих на кровле силла, и указывает на похожие условия изменения осадков над силлом и под ним. При изменении осадков, расположенных над и под силлом, содержание РЗЭ в них немного уменьшилось. Это уменьшение, возможно, произошло при растворении калиевых полевых шпатов.

Изменение состава осадков, расположенных над комплексом силлов мощностью ~120 м

Выше комплекса силлов общей мощностью не менее 120 м, который находится в нижней части скважины в интервале 339.15–464 м (керны 40–54), расположена зона измененных осадков в интервале 330–339 м [6] (см. рис. 2). Из нее изучены образцы 2751 (337.90 м) и 2752 (338.65 м), расположенные над кровлей силла, в 2 и ~0.5 м от нее.

В образцах 2751 и 2752 сильно уменьшилось содержание $C_{орг}$ и Са и в меньшей степени – Mn и P. Содержание К слабо увеличилось. В образце 2752, который находится на кровле силла, уменьшилось также содержание Fe и увеличилось содержание Mg (рис. 3б). В образцах 2751, 2752 уменьшилось содержание Li, Sr, Cs и одновременно увеличилось содержание Cr, Ni, Mo (рис. 4б). В образце 2752 уменьшилось содержание As так же сильно, как в образце из осадков, расположенных на контакте с кровлей силла мощностью ~3 м. В этом образце, в отличие от вышележащего образца 2751, уменьшилось содержание Sb, Pb. Содержание РЗЭ в образцах 2751, 2752, по сравнению со средним содержанием РЗЭ в неизмененных осадках, слабо уменьшилось (рис. 5б). В образце 2752 сильнее, чем содержание других РЗЭ, уменьшилось содержание La, Ce.

В целом, изменения химического состава (содержание макро- и микроэлементов, РЗЭ) осадков, расположенных на контакте с кровлей тонкого силла мощностью ~3 м и на кровле комплекса силлов мощностью ~120 м, близки друг другу.

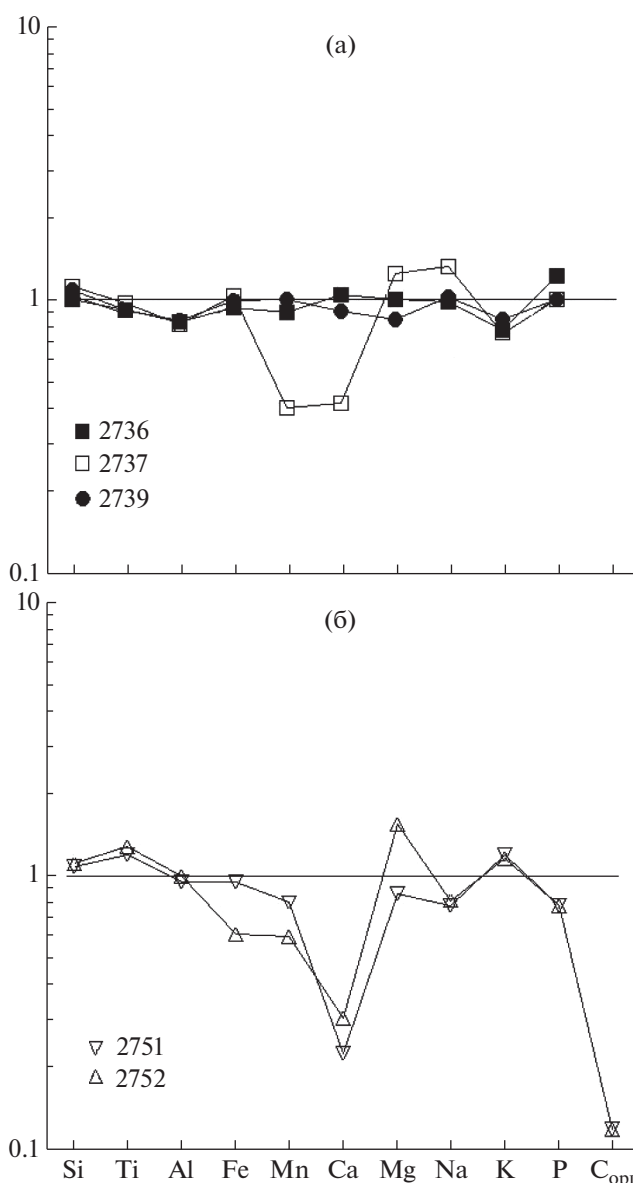


Рис. 3. Содержание макроэлементов и $C_{орг}$ в измененных осадках из скважины 478. Нормировано по среднему составу неизмененных осадков. а – осадки над и под силлом мощностью 3 м; б – осадки над кровлей комплекса силлов мощностью не менее 120 м. Здесь и далее числа, соответствующие условным обозначениям точек на графиках – номера образцов из скважины 478 (см. текст).

До получения этих результатов ожидалось, что над комплексом силлов (~120 м) изменения осадков должны были произойти значительно сильнее, чем в осадках над другим индивидуальным силлом мощностью ~3 м. Объяснить результаты, не подтвердившие это ожидание, можно следующим образом. Комплекс силлов начал формироваться с внедрения в осадочный покров самого верхнего силла, который имел мощность в первые метры, и в результате произошли изменения

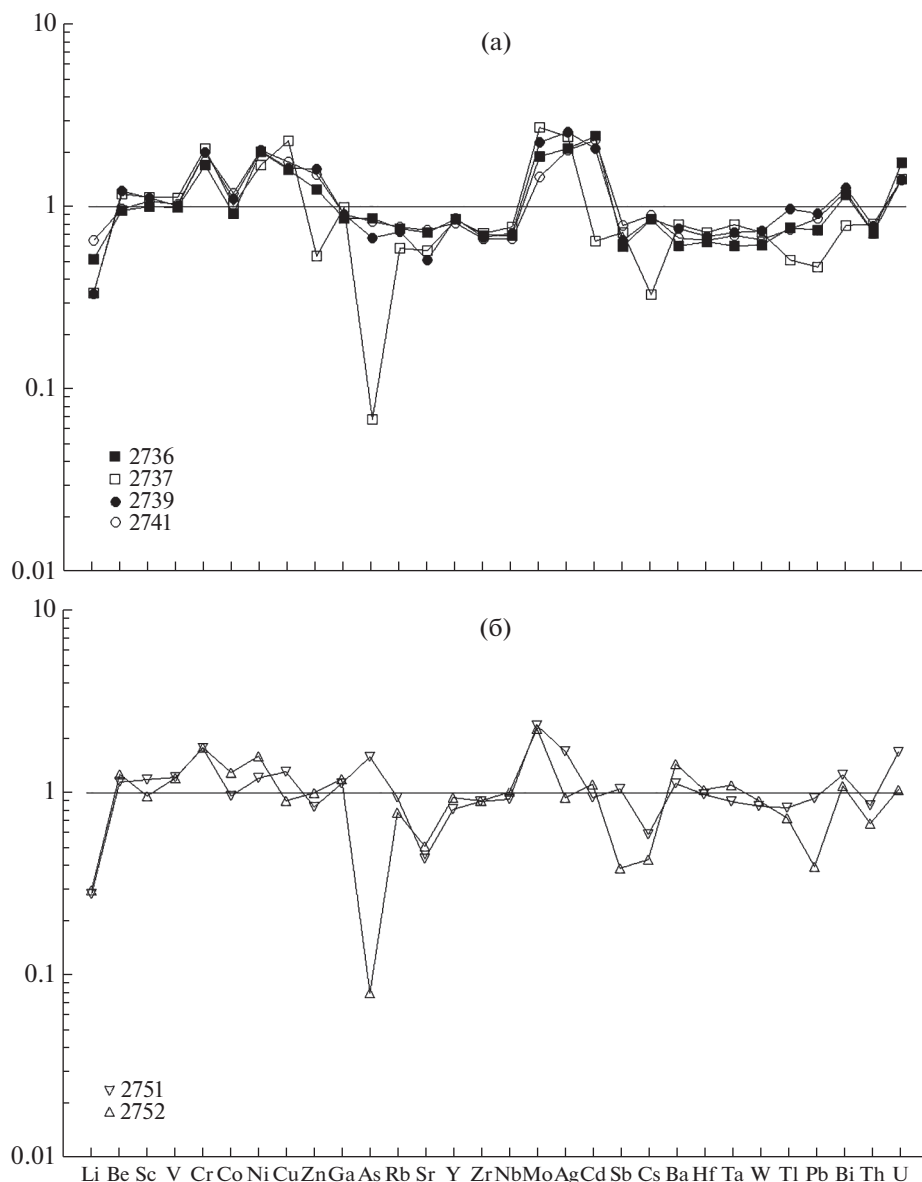


Рис. 4. Содержание микроэлементов в измененных осадках из скважины 478. Нормировано по среднему составу неизмененных осадков.
а – осадки над и под силлом мощностью 3 м; б – осадки над кровлей комплекса силлов мощностью не менее 120 м.

химического состава, похожие на изменения, которые установлены над индивидуальным силлом мощностью ~3 м. Внедрение остальных силлов произошло ниже первого силла, который блокировал тепло более поздних силлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучение осадков из скважины 478 завершило изучение с применением метода ICP-MS изменения химического состава плейстоценовых осадков (турбидитов, переслаивающихся с гемипелагическими осадками) во впадине Гуаймас Калифорнийского залива в гидротермальных системах,

сформированных внедрившимися в осадочный покров базальтовых силлов разной мощности. В этом типе гидротермальных систем проведено на сегодняшний день изучение изменения осадков из всех скважин, пробуренных во впадине Гуаймас. До скважины 478 были изучены осадки из скважины 477, расположенной в южном трого [1, 3], и из скважины 481А, которая пробурена в северном трого [2].

2. В верхнеплейстоценовых осадках из скважины 478, в зонах контакта с индивидуальным силлом мощностью ~3 м произошли следующие изменения химического состава. В осадках, расположенных над силлом, наиболее заметно умень-

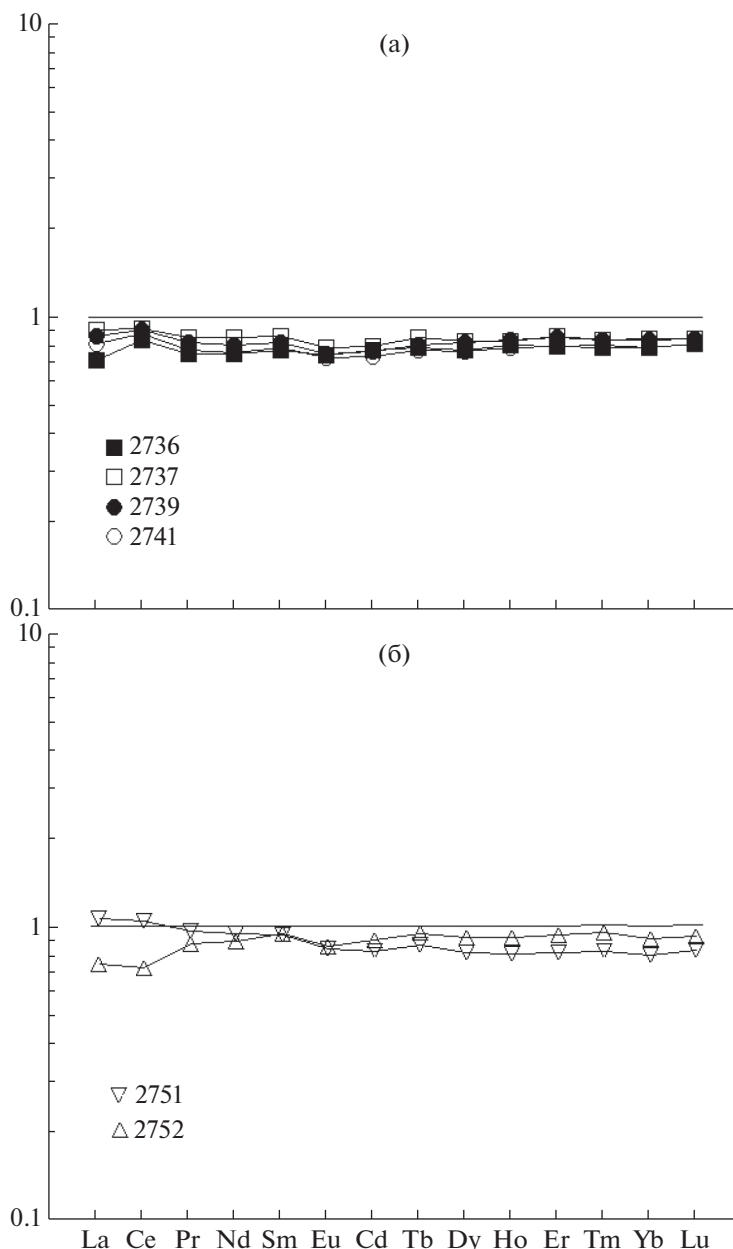


Рис. 5. Содержание РЗЭ в измененных осадках из скважины 478. Нормировано по среднему составу неизмененных осадков.
 а – осадки над и под силлом мощностью 3 м; б – осадки над кровлей комплекса силлов мощностью не менее 120 м.

шилось содержание Mn и Ca и увеличилось содержание Mg и Na по сравнению с их содержанием в неизмененных осадках. В осадках, расположенных непосредственно под подошвой силла, изменения содержания макроэлементов слабые (Al, Mg, K). Изменение содержания микроэлементов в осадках над силлом и под ним во многом похоже. В них увеличилось содержание Cr, Ni, Cu, Mo, Ag, U и уменьшилось содержание Li, а также слабо уменьшилось содержание Rb, Sr, Zr, Nb, Sb, Ba, Hf, Ta, W, Th. В образце, который находится на кровле силла, дополнительно к перечислен-

ным выше элементам уменьшилось содержание Zn, Cd, Cs, Tl, Pb, Bi, особенно сильно уменьшилось содержание As. Содержание РЗЭ слабо уменьшилось как в осадках над силлом, так и под ним.

3. В комплексе силлов общей мощностью ~120 м его верхняя часть представлена силлом с мощностью в первые метры, который внедрился в осадочный покров до внедрения остальных силлов этого комплекса. Этот силл блокировал тепло от комплекса более поздних силлов. В результате изменение осадков над комплексом силлов мощностью не менее 120 м похоже на изменения осадков

над индивидуальным силлом мощностью ~3 м, рассмотренные выше в пункте 2. Уменьшение содержания многих микроэлементов (Li, As, Rb, Sr, Sb, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th) связано, по-видимому, с сильным сокращением содержания в этих осадках $C_{\text{орг}}$. Увеличение содержания Cr, Ni, Cu, Mo, Ag, Cd, U, скорее всего, имеет отношение к формированию глинистых минералов с соответствующими сорбционными свойствами. Незначительное уменьшение в них содержания РЗЭ, возможно, сопровождается растворением многочисленных калиевых полевых шпатов в зонах контактов осадков с силлами.

4. Полученные результаты изучения изменения химического состава осадков, вмещающих базальтовые силлы из скважины 478, а также из скважин 477 и 481А, пробуренных во впадине Гуаймас, можно использовать как модель изменения химического состава осадков под влиянием тепла внедрившихся в них силлов, которые формируют кратковременные гидротермальные системы. Этот тип гидротермальных систем, по-видимому, широко развит в срединно-океанических хребтах, перекрытых осадочным чехлом, которые расположены около континентов. К таким регионам, прежде всего, можно отнести срединно-океанические хребты северо-восточного сектора Тихого океана (Хуан де Фука, Горда, Эксплорер) и окраинные моря, расположенные вдоль Азиатского континента.

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

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного плана научно-исследовательских работ (Геологический институт Российской Академии наук) № 0135-2019-0053.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блинова Е.В., Курносое В.Б.* Гидротермальные изменения осадков в южном трого впадины Гуаймас Калифорнийского залива и трансформация состава растворов // Литология и полезные ископаемые. 2015. № 6. С. 491–509.
2. *Гончаров Е.О., Курносое В.Б., Коновалов Ю.И. и др.* Гидротермально измененные осадки из зон контактов с силлами в северном трого впадины Гуаймас, Калифорнийский залив, скважина DSDP 481/481А // Океанология. 2020. № 1. С. 114–124.
3. *Курносое 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.
4. *Curray J.R., Moore D.G., Aguayo J.E. et al.* Init. Repts. DSDP. 64. Pt. 1. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1982. 507 p.
5. *Gieskes J.M., Elderfield H., Lawrence J.R. et al.* Geochemistry of interstitial waters and sediments, Leg 64, Gulf of California // Init. Repts. DSDP. 1982. V. 64. Part 2. P. 675–694.
6. *Kastner M.* Evidence for two distinct hydrothermal systems in the Guaymas Basin // Init. Repts. DSDP. 1982. V. 64. Part 2. P. 1143–1158.
7. *Lawver L.A., Williams D.L.* Heat flow in the central Gulf of California // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № B7. P. 3465–3478.
8. *Lonsdale P., Bischoff J.L., Burns V.M. et al.* A high-temperature hydrothermal deposit on the seabed at a Gulf of California spreading center // Earth and Planet. Sci. Lett. 1980. V. 49. P. 8–20.
9. *Moore D.G.* Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California structural province // Geol. Soc. Am. Bull. 1973. № 84. P. 1883–1906.
10. *Niemitz J.* Geochemistry of sediments, Leg 64, Gulf of California // Init. Repts. DSDP. 1982. V. 64. Part 2. P. 695–716.
11. *Williams D.L., Becker K., Lawver L.A., Von Herzen R.P.* Heat flow at the spreading centers of the Guaymas Basin, Gulf of California // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № B12. P. 6757–6796.

Change of Chemical Composition of Sediments in Contact Zones with Basalt Sills, the Guaymas Basin, Gulf of California (Hole DSDP 478)

E. O. Goncharov^a, V. B. Kurnosov^a, Yu. I. Kononov^a

^a*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: evgenigonch91@gmail.com*

^{##}*e-mail: vic-kurnosov@rambler.ru*

^{###}*e-mail: yukonov@mail.ru*

On the example of the Guaymas Basin in the Gulf of California (Hole DSDP 478) are showing the change of the chemical composition of Upper Pleistocene sediments in specific short-term hydrothermal systems that arise when basalt sills are intruded into cold highly porous sediments with sea water. Alteration of chemical composition of the sediments (turbidites interbedded with hemipelagic sediments) from contact zones with basalt sills in the Guaymas Basin, Gulf of the California (DSDP Hole 478) was studied by the methods of XRF and ICP-MS.

Keywords: Guaymas Basin, Gulf of California, sediments, basalt sills, hydrothermal systems