

УДК 551.465

## ГИДРОТЕРМАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ВЕРХНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОСАДКОВ ИЗ ЗОН КОНТАКТОВ С СИЛЛАМИ ВО ВПАДИНЕ ГУАЙМАС, КАЛИФОРНИЙСКИЙ ЗАЛИВ

© 2020 г. Е. О. Гончаров<sup>1, \*</sup>, В. Б. Курносов<sup>1, \*\*</sup>, Ю. И. Коновалов<sup>1</sup>,  
А. Р. Гептнер<sup>1</sup>, К. Р. Галин<sup>1</sup>, Н. Н. Игнатьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

\*e-mail: zevs159357@list.ru

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

Поступила в редакцию 26.11.2018 г.

После доработки 18.06.2019 г.

Принята к публикации 18.06.2019 г.

Во впадине Гуаймас Калифорнийского залива (скважина DSDP 481A) химический состав верхнеплейстоценовых осадков (турбидитов, переслаивающихся с гемипелагическими осадками) из зон контактов с базальтовыми силлами изучен методами рентгено-флюоресцентного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. В осадках изменение содержания большинства макроэлементов из этих зон не произошло, либо проявилось слабо. В то же время, это обстоятельство не указывает на неподвижность или слабую подвижность макроэлементов, так как процесс перераспределения элементов происходит в данном случае внутри осадков без изменения химического состава осадков в целом, что связано с процессом растворения/отложения, в котором участвуют, прежде всего, диатомовые, опал С-Т, кварц, а также глинистые минералы. В то же время, для гидротермально измененных осадков из зон контактов с силлами характерным является сильное уменьшение содержания  $C_{орг}$ , Li, Cu, As, Mo, Ag, Cd, Sb, Ta, W, Tl, Pb, Bi.

**Ключевые слова:** Калифорнийский залив, впадина Гуаймас, скважина, химический состав

**DOI:** 10.31857/S0030157420010128

Калифорнийский залив представляет собой пример современного формирования океанической коры на ранней стадии открытия океанов при рифтинге континентальных окраин [9, 13], когда в спрединговых рифтах накапливаются с большой скоростью (1200–2300 м/млн лет) осадки мощностью от первых сотен метров до 2–3 км и базальтовые расплавы не изливаются на поверхность дна в течение формирования осадочного покрова, а внедряются в виде базальтовых силлов в молодые нелитифицированные обводненные осадки.

Внедрение горячих базальтовых силлов в осадочный покров сопровождается формированием кратковременных гидротермальных систем, в которых происходит изменение осадков, вмещающих силлы [8]. Первоначально изучение изменения минерально-химического состава осадков во впадине Гуаймас было проведено М. Кастнер и Дж. Нимитцем [8, 14]. Исследование, начатое этими авторами, целесообразно было продолжить, существенно расширив спектр изучаемых микроэлементов, а также включив в это исследование не изученные прежде осадки, входящие в

состав комплекса силлов, которые по данным, полученным в рейсах DSDP 64 и 65 [6, 11], широко распространены в Калифорнийском заливе.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Впадина Гуаймас расположена в главной разломной зоне Калифорнийского залива, состоящей из системы осей спрединга и трансформных разломов [13], продолжающей Восточно-Тихоокеанское поднятие и переходящей на Северо-Американском континенте в зону разломов Сан-Андреас (рис. 1а). Во впадине накопились верхнеплейстоценовые осадки общей мощностью в несколько сотен метров, которые состоят из турбидитов, переслаивающихся с гемипелагическими осадками и диатомовыми илами [6].

Во впадине Гуаймас находятся южный и северный трюги, представляющие собой спрединговые центры, разделенные трансформными разломами (рис. 1б). Это депрессии шириной 3–4 км и глубиной 2000 м. Северный трюг протягивается на 35 км, южный — на 25 км. Во всех скважинах, пробуренных во впадине Гуаймас, в осадочном

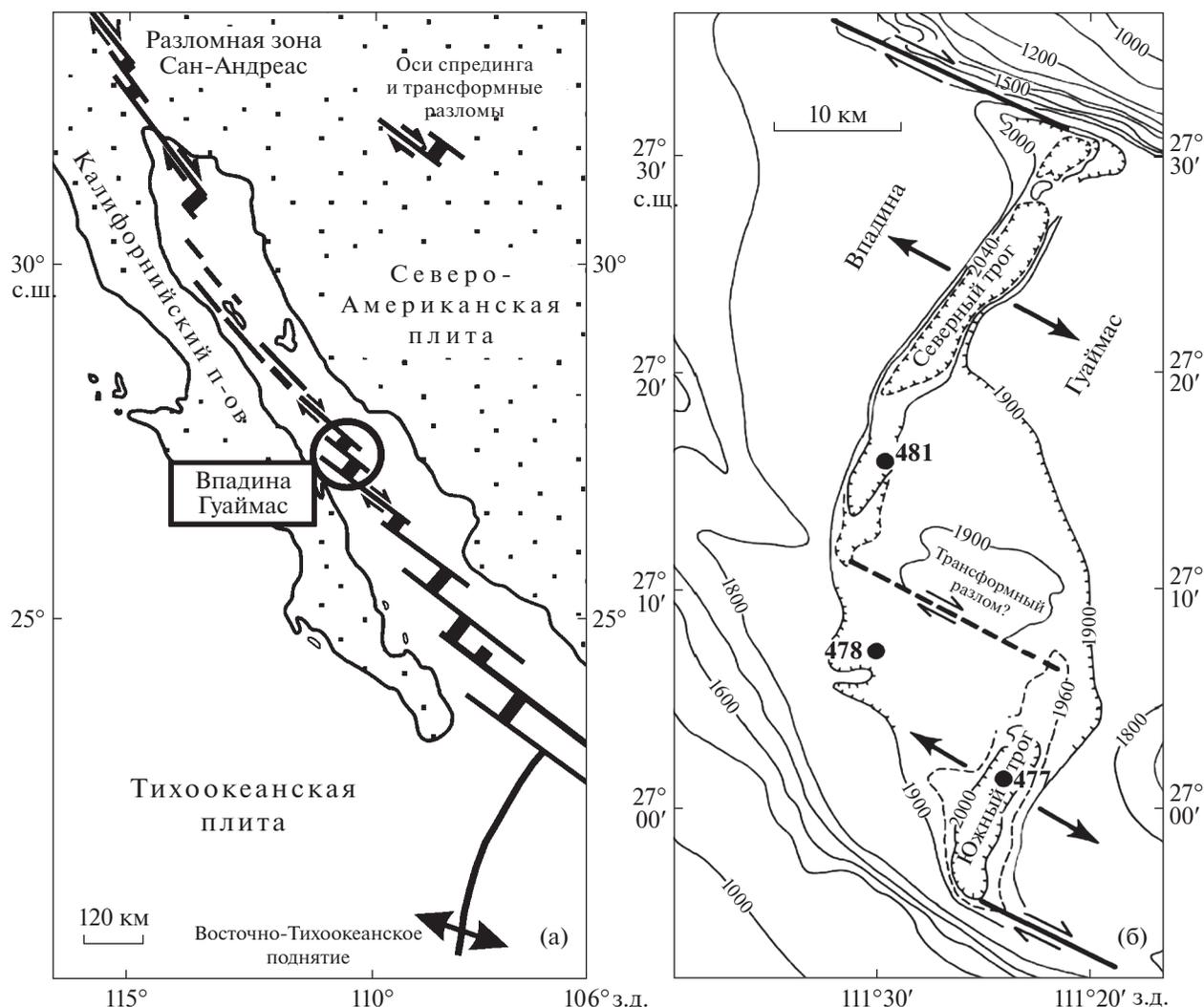


Рис. 1. Структурная схема Калифорнийского залива (а) и расположение скважин глубоководного бурения во впадине Гуаймас – стрелки показывают направление движения плит (б) по [12].

покрова встречены силлы. В северном трог пробурена скважина 481А глубиной 384 м, в которой комплекс силлов состоит из чередования тонких силлов и осадков, общей мощностью 27 м.

Скважина 481А расположена в районе с низким тепловым потоком, который составляет  $167 \text{ мВт/м}^2$  [7, 15]. Она пробурена за пределами действия основной долгоживущей гидротермальной системы, что позволяет на ее примере выяснить, какие изменения вещественного состава осадков происходят под влиянием только силлов, без притока тепла и вещества из основной гидротермальной системы.

М. Кастнер [8] по петрографическим данным выделила в скважинах, пробуренных во впадине Гуаймас, минеральные зоны измененных осадков в кратковременных гидротермальных системах, возникших при внедрении силлов в осадочный

покров. В том числе, были изучены глинистые минералы, как наиболее чувствительные минеральные индикаторы гидротермальных процессов. Полученные результаты по количественному соотношению глинистых минералов были ориентировочные: “много”, “мало”, “примесь”. В дальнейшем глинистые минералы из осадков, вскрытых скважинами 477, 477А, 478, были детально изучены нами с использованием метода моделирования дифракционных рентгеновских картин [3–5].

М. Кастнер [8] установила, что в осадках из этих зон растворяются диатомовые. В этих осадках установлено небольшое количество новообразованного кварца в смеси с терригенным кварцем, а также опала С-Т. В отдельных образцах кварц на 50% новообразованный, в других образцах доминирует опал С-Т. В измененных осадках присутствует немного пирита и гипса, а также

К-полевого шпата. Клиноптилолит исчезает одновременно с опалом-А. В измененных осадках иногда встречается в разных количествах доломит. В осадках из зон их непосредственного контакта с силлами кварц представляет смесь терригенного и новообразованного кварца.

Химический состав осадков из скважин, пробуренных во впадине Гуаймас, на начальном этапе их исследования был изучен методом РФА [14]. По содержанию микроэлементов в осадках были получены данные, ограниченные шестью элементами (Co, Cr, Cu, Ni, V, Zn).

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение содержания макроэлементов в валовых образцах осадков проведено методом рентгено-флюоресцентного анализа (РФА) в лаборатории химико-аналитических исследований Геологического института РАН (г. Москва). Совместно с РФА использованы методы “мокрой” химии, прежде всего, для раздельного определения  $Fe_2O_3$  и FeO, другие методы аналитической химии были применены для определения содержания в осадках  $CO_2$ ,  $C_{орг}$ ,  $H_2O^-$ . Содержание микроэлементов определено 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) с разложением образцов осадков (пудры) в автоклаве.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав осадков из скв. 481А приведен в табл. 1, 2, 3.

Результаты оценки изменения химического состава осадков под воздействием базальтовых силлов показаны на рисунках в виде спайдерграмм составов образцов измененных осадков из зон контактов осадков с силлами, нормированных по среднему составу неизмененных осадков. Все образцы неизмененных осадков (2823, 3107, 2824, 3108, 2845, 2847, 2848, 2854) взяты из скв. 481А, из интервалов, в которых влияние силлов на осадки не проявилось.

### ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОСАДКОВ, ЗАКЛЮЧЕННЫХ В КОМПЛЕКСЕ ТОНКИХ СИЛЛОВ

В скв. 481А в разрезе плейстоценового осадочного покрова, в интервале 170.55–196 м (керны 14–16) встречен комплекс тонких силлов, в котором тонкие силлы чередуются с осадками небольшой мощности (рис. 2). Химический состав этих осадков не был изучен в предыдущих

исследованиях [14]. Мощность индивидуальных силлов в этом комплексе составляет от 0.23 до 0.53 м; мощность осадков, заключенных между силлами – от 0.17 до 3.75 м. Осадки между силлами находятся в интервалах 170.78–170.95, 171.25–175, 175.52–175.65, 176.1–176.19 м (см. рис. 2а, 2б). Из них взяты образцы 2833 (170.90 м), 2835 (171.25 м), 2837 (175.55 м), 2839 (176.12 м).

В этих осадках сильно уменьшилось содержание  $C_{орг}$  (рис. 3а). Во всех образцах, кроме образца 2833, уменьшилось содержание Mn, слабо увеличилось содержание Ti, Na. Незначительное увеличение содержания Fe, Mg, K произошло в отдельных образцах. В целом, в осадках, запечатанных между силлами, существенно изменилось только содержание  $C_{орг}$  по сравнению с неизмененными осадками, и в меньшей степени, содержание Mn.

Во всех образцах осадков, заключенных между силлами, уменьшилось содержание Cu, As, Mo, Ag, Cd, Sb, Bi (рис. 4а). В меньшей степени уменьшилось содержание Li, Ni, Zn, Cs, W, Tl, Pb. Для этих условий изменения осадков не характерно увеличение содержания в них микроэлементов. Только содержание Ba немного увеличилось. Содержание остальных микроэлементов осталось практически без изменения по сравнению с их содержанием в неизмененных осадках. Содержание РЗЭ в образцах 2837, 2839 не изменилось (рис. 5а). В образцах 2833, 2835 их содержание слабо увеличилось.

Таким образом, в осадках, заключенных внутри комплекса тонких силлов, произошло заметное изменение содержания ряда химических элементов. В них существенно уменьшилось содержание  $C_{орг}$ , Cu, As, Mo, Ag, Cd, Sb, Bi и в меньшей степени Mn, Li, Ni, Zn, Cs, W, Tl, Pb. В этих условиях нет увеличения содержания элементов в осадках, кроме слабо увеличившегося в них содержания Ba.

### ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОСАДКОВ НАД КОМПЛЕКСОМ ТОНКИХ СИЛЛОВ

Над кровлей комплекса силлов зона измененных осадков в скв. 481А находится в интервале от 130 до 170.55 м [8]. Из этого интервала взяты образцы 2826 (139.25 м), 2827 (163.20 м), 2829 (167.75 м), а также 2830 (170.05 м), 2831 (170.50 м) из осадков, расположенных непосредственно на контакте с силлом (см. рис. 2а).

Результаты изучения химического состава образца 2826 из верхней части зоны измененных осадков показали, что содержание в нем макро- и микроэлементов, РЗЭ не отличается от содержания этих элементов в неизмененных осадках. Поэтому образец 2826 был ошибочно включен в зону

Таблица 1. Химический состав осадков из скв. 481А, впадина Гуаймас Калифорнийского залива, данные РФА (вес. %)

Образец	Керн-секция, интервал, см	Глубина, м	Осадки	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	Сумма	Cl	CO <sub>2</sub>	C <sub>опт.</sub>
2814	1Н-1, 0-5	0	1	55.5	0.36	8.2	2.57	0.42	0.22	3.6	2.78	6.86	1.59	0.15	18.29	100.6	8	1.5	2.42
2816	2Н-2, 35-40	6.55	1	57.9	0.44	8.3	3.20	0.38	0.07	5.1	2.49	4.27	1.77	0.17	15.51	99.66	3.8	2.4	1.15
2819	8Н-3, 16-21	36.06	1	58.6	0.44	8.2	3.06	0.64	0.2	6.2	2.41	2.44	1.63	0.19	16.16	100	2.3	2.8	2.36
2820	8Н-3, 48-54	36.38	1	54.4	0.46	9.0	3.01	0.60	0.17	6.9	2.6	3.71	1.57	0.23	17.01	99.73	2.67	2.7	1.72
2822	11Н-3, 73-78	50.98	1	59.3	0.82	13.7	4.81	0.26	0.19	4.7	2.61	3.4	2.69	0.24	7.72	100.49	1.29	1.26	0.71
2823	4R-2, 55-59	72.55	1	59.6	0.75	13.3	4.76	0.52	0.16	3.7	3.11	2.09	2.53	0.22	9.02	99.78	0.94	1.5	0.83
3107	6R-4, 42-48	94.42	1	57.77	0.51	13.51	3.51	0.92	0.06	2.75	2.69	2.12	2.47	0.25	12.51	99.07	0.64	1.50	0.81
2824	6R54, 75-80	96.15	1	63.2	0.88	14.0	3.59	1.06	0.06	3.5	2.49	2.92	2.88	0.22	4.57	99.39	0.52	0.3	<0.1
3108	9R-4, 7-12	122.5	1	61.87	0.26	7.87	2.29	0.45	0.34	3.34	1.83	1.79	1.39	0.19	16.36	97.98	1.65	2.56	0.93
2825	9R-6, 110-115	126.60	1	63.8	0.42	8.9	3.24	0.37	0.64	5.9	1.80	1.77	1.79	0.19	11.33	100.1	1.4	3.45	1.22
2826	11R-2, 75-80	139.25	2	62.5	0.76	13.4	4.37	0.41	0.11	3.7	2.74	2.33	2.65	0.20	6.15	99.21	1.35	0.85	0.65
2827	13R-5, 120-125	163.20	2	66.2	0.91	13.8	2.93	1.19	0.09	2.8	2.72	2.62	2.77	0.22	2.89	99.17	0.42	0.3	0.14
2828	14R-1, 50-55	166.00	2	71.4	0.43	13.2	1.00	1.48	0.06	2.8	1.08	3.45	2.71	0.12	1.68	99.33	0.42	0.6	<0.1
2829	14R-2, 75-80	167.75	2	62.1	0.82	14.1	2.94	2.26	0.09	3.7	3.64	2.40	2.76	0.22	4.12	99.06	0.72	2.1	0.38
2830	14R-4, 5-10	170.05	2	61.4	0.81	13.7	2.08	2.54	0.10	4.4	3.81	3.36	2.75	0.22	4.44	99.59	1.15	1.05	0.29
2831	14R-4, 50-53	170.50	2	61.0	1.08	13.9	2.71	3.04	0.11	5	4.72	2.76	2.55	0.23	2.4	99.49	0.14	0.65	0.12
2833	14R-4, 90-94	170.90	4	64.8	0.86	14.6	1.64	4.32	0.11	2.9	3.31	3.22	3.4	0.23	0.64	100	0.24	<0.2	<0.1
2835	14R-4, 125-129	171.25	4	64.4	0.87	14.7	2.45	3.49	0.07	2.8	4.19	3.06	2.73	0.23	0.67	99.73	0.15	<0.2	<0.1
2837	15R-1, 55-60	175.55	4	64.9	0.88	14.6	2.00	2.48	0.07	3.2	2.38	4.11	3.60	0.23	0.82	99.31	0.25	<0.2	<0.1
2839	15R-1, 112-115	176.12	4	67.3	0.83	13.9	2.12	2.06	0.05	2.7	2.25	3.69	3.51	0.21	0.53	99.09	0.22	<0.2	<0.1
2844	18R-1, 0-6	203.50	3	62.0	0.82	13.1	4.12	0.81	0.12	3.7	3.15	2.81	2.55	0.22	6.17	99.46	1.14	1.5	0.16
2845	20R-1, 0-5	222.50	1	59.0	0.68	12	4.67	0.29	0.19	4.2	2.64	2.32	2.49	0.19	11.22	99.88	1.81	2.15	0.34
2846	24R-1, 70-75	261.20	1	60.5	0.77	12.6	3.10	1.65	0.19	5.6	2.62	2.59	2.86	0.21	6.81	99.49	0.5	4.7	0.19
2847	25R-1, 105-110	271.05	1	62.0	0.81	13.6	5.26	0.49	0.07	3.1	2.97	2.62	3.03	0.22	6.28	100.5	0.75	1.35	0.42
2848	28R-1, 75-79	299.25	1	60.7	0.77	13.1	4.81	0.6	0.09	3.8	2.82	2.47	2.74	0.21	7.35	99.43	0.79	1.25	0.74
2849	30R-3, 60-65	321.10	1	63.6	0.48	10.1	3.04	0.68	0.09	7.1	1.88	1.74	1.88	0.18	9.05	99.84	0.81	3.55	0.79
2854	31R-1, 100-104	328.00	1	63.4	0.73	11.0	4.42	0.81	0.08	3.4	3.09	2.66	2.77	0.20	7.36	100	1.11	1.05	0.96
2855	33R-1, 23-26	346.23	2	66.9	0.55	10.2	4.95	0.92	0.05	3.1	3.76	3.23	1.51	0.20	4.24	99.58	1.58	<0.2	0.65
3109	33R-1, 62-67	346.62	2	66.95	0.33	10.2	3.03	0.7	0.06	2.58	3.58	3.03	1.31	0.28	7.16	99.21	0.59	<0.2	0.34

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 скв. 481А, 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
Z-2814	1	37.3	1.0	5.9	83.4	35.7	10.3	39.8	33.9	209	9.9	9.9	64.3	247	13.1	68.3	5.4	7.6	0.81	1.7	3.1	7.4	582	2.3	0.38	0.89	0.46	35.2	0.19	5.3	5.8
Z-2816	1	37.1	1.1	7.0	76.3	52.7	8.8	42.2	35.7	124	11.6	8.3	65.1	295	14.9	87.8	6.2	12.2	0.61	2.4	1.7	7.1	553	2.8	0.45	0.84	0.56	21.0	0.19	6.1	8.4
Z-2819	1	37.7	1.1	7.3	85.1	57.4	9.6	50.1	38.0	134	11.2	8.6	59.0	312	14.7	74.8	5.8	8.8	0.66	2.7	2.4	6.9	433	2.6	0.40	1.0	0.55	20.3	0.19	5.6	7.7
Z-2820	1	34.0	1.0	7.4	90.0	62.2	8.7	51.5	35.5	121	11.3	9.3	46.3	399	14.3	73.7	5.3	12.6	0.54	4.0	2.1	6.0	479	2.6	0.37	0.90	0.52	17.2	0.17	4.8	10.1
Z-2822	1	47.3	1.4	8.2	99.2	43.4	12.8	26.4	23.4	105	16.2	13.4	93.7	371	20.3	137	11.1	3.5	0.29	1.3	3.2	10.4	694	4.3	0.77	1.6	0.76	20.9	0.15	8.3	3.7
Z-2823	1	61.5	1.7	9.7	97.7	42.5	12.8	29.4	27.2	116	17.9	12.6	107	303	22.4	145	11.3	4.0	0.29	1.6	2.9	14.3	657	4.6	0.79	1.7	0.81	24.4	0.22	9.9	4.1
Z-3107	1	55.0	1.5	11.0	96.9	38.3	11.6	28.0	27.9	93.1	16.2	13.9	105	280	24.7	161	12.9	4.8	0.27	1.0	3.3	13.1	658	3.9	0.80	1.9	0.79	25.8	0.25	11.5	3.8
Z-2824	1	41.7	1.5	7.1	87.8	41.5	11.2	17.3	16.5	78.1	16.8	10.8	100	329	21.3	142	12.4	1.4	0.14	0.46	2.8	9.3	810	4.6	0.85	1.7	0.68	16.2	0.13	9.6	2.4
Z-3108	1	31.1	1.0	7.8	82.6	34.0	9.3	33.1	35.0	114	10.3	7.8	71.6	248	16.6	95.5	7.3	6.4	0.39	2.0	3.2	7.7	465	2.3	0.47	1.2	0.65	67.9	0.21	7.4	4.6
Z-2825	1	30.9	1.2	6.1	87.5	38.0	11.7	31.9	40.7	150	11.4	10.9	64.9	279	15.5	91.0	6.7	2.5	0.44	2.24	3.7	7.8	454	2.8	0.45	1.1	0.63	27.8	0.20	6.33	3.89
Z-2826	2	44.1	1.7	8.0	90.0	38.1	9.7	21.8	24.2	84.4	14.2	11.6	106	298	19.9	131	10.3	4.2	0.19	0.93	2.9	10.5	703	3.9	0.81	1.8	0.74	18.7	0.18	9.1	2.7
Z-2827	2	44.0	1.6	7.8	91.3	37.4	9.2	18.9	20.0	79.5	14.6	6.9	117	327	18.6	150	10.7	1.8	0.18	0.61	2.7	8.2	811	4.7	0.84	1.8	0.73	15.4	0.16	9.5	2.4
Z-2828	2	15.4	1.7	4.2	47.8	18.1	5.7	12.7	26.9	42.9	11.4	4.2	102	297	14.9	114	7.1	2.0	0.71	0.22	2.2	4.4	764	3.4	0.62	1.3	0.77	30.4	0.07	7.6	1.9
Z-2829	2	44.5	1.8	9.4	105	38.3	10.4	24.5	27.0	91.0	15.3	11.7	121	338	22.7	149	10.9	3.8	1.7	0.81	3.0	8.9	738	4.4	0.83	2.0	0.83	26.4	0.22	10.5	3.3
Z-2830	2	31.0	1.7	8.5	88.6	36.0	9.9	20.2	23.5	66.2	14.3	8.3	107	341	20.7	130	10.2	3.0	0.48	0.34	2.6	4.9	768	3.9	0.80	1.8	0.68	12.4	0.17	9.4	2.7
Z-2831	2	24.2	1.5	14.3	134	81.5	14.3	41.0	24.1	66.7	15.3	6.0	105	342	25.8	170	9.6	2.6	0.41	0.21	2.2	6.3	672	4.4	0.73	1.6	0.64	10.7	0.14	8.2	2.5
Z-2833	4	23.8	2.0	11.5	107	26.5	12.5	25.7	5.2	93.0	17.9	0.95	130	316	26.0	173	12.2	3.7	<ПО	0.21	0.60	9.8	1318	5.2	0.96	0.90	0.61	8.7	<ПО	11.6	3.3
Z-2835	4	36.1	1.9	11.2	101	37.2	11.1	25.4	5.9	56.7	17.5	0.70	104	290	28.3	164	12.4	2.1	<ПО	0.20	0.51	10.0	805	4.9	0.94	1.3	0.66	9.4	<ПО	10.8	3.4
Z-2837	4	32.3	1.6	8.9	92.3	39.4	8.3	17.0	7.6	57.5	15.9	0.41	120	362	20.8	154	12.0	1.1	<ПО	0.27	0.24	6.8	1112	4.5	0.92	0.62	0.21	8.2	<ПО	10.7	2.8
Z-2839	4	32.3	1.6	8.0	74.1	36.8	9.2	14.2	15.3	74.8	14.8	1.8	125	360	19.5	138	11.4	0.5	<ПО	0.09	0.35	11.9	1044	4.2	0.92	1.2	0.27	11.8	<ПО	10.2	2.7
Z-2844	3	38.9	1.6	8.3	89.1	39.9	9.8	20.9	23.8	82.3	13.9	10.4	103	304	19.0	135	10.0	3.7	0.15	0.88	3.1	9.3	627	4.0	0.74	1.7	0.70	21.3	0.17	9.0	2.9
Z-2845	1	49.7	1.7	9.2	117	37.7	11.4	28.6	34.9	108	13.9	13.5	106	308	20.0	126	9.2	7.5	0.37	1.4	4.2	11.3	593	3.7	0.69	1.7	0.72	36.9	0.22	8.7	3.6
Z-2846	1	47.5	1.6	8.2	84.8	36.4	10.1	23.0	24.3	91.5	14.1	9.5	117	380	19.4	136	10.1	2.2	0.91	0.82	3.4	9.8	766	4.0	0.77	1.7	0.71	21.7	0.18	10.0	3.5
Z-2847	1	64.1	2.0	9.9	100	36.3	10.1	25.7	31.5	102	16.4	14.9	122	261	23.0	158	11.2	4.6	0.31	1.1	3.1	14.6	600	4.6	0.86	2.0	0.81	22.2	0.26	10.9	3.3
Z-2848	1	63.5	1.9	10.4	84.0	39.7	11.2	27.4	33.2	108	16.0	12.2	121	305	23.3	155	11.1	5.4	0.30	1.4	3.3	14.0	620	4.4	0.87	2.0	0.87	24.7	0.25	10.6	3.7
Z-2849	1	37.6	1.3	8.8	99.1	53.5	10.2	36.9	36.4	120	13.1	9.9	109	447	19.1	90	7.6	14.0	0.77	3.42	2.8	7.5	589	2.9	0.59	1.1	0.93	22.4	0.19	7.7	5.9
Z-2854	1	57.3	1.8	10.3	106	37.9	11.8	26.0	32.3	108	16.7	16.7	153	280	23.3	141	11.4	5.3	0.39	1.84	3.3	15.4	716	4.1	0.87	1.9	0.92	67.7	0.26	10.5	3.0
Z-2855	2	11.2	1.4	10.9	107	71.4	14.6	41.4	44.3	219	14.4	3.5	69.6	274	21.4	107	9.0	12.4	0.27	6.48	1.9	4.3	628	3.2	0.70	2.1	0.50	36.5	0.31	9.0	5.1
Z-3109	2	13.5	1.5	9.8	105	60.9	10.2	38.3	39.7	190	13.6	2.2	50.9	244	21.8	109	9.5	20.8	0.62	2.8	3.6	7.8	611	2.8	0.62	1.4	0.66	25.6	0.27	10.0	6.2

Примечание. 1 — неизменные осадки; 2, 3, 4 — термально измененные осадки; 2 — над силлом, 3 — под силлом, 4 — между силлами.  
<ПО — меньше предела обнаружения.

**Таблица 3.** Содержание РЗЭ в осадках из скв. 481А, впадина Гуаймас Калифорнийского залива, данные ICP-MS (мкг/г)

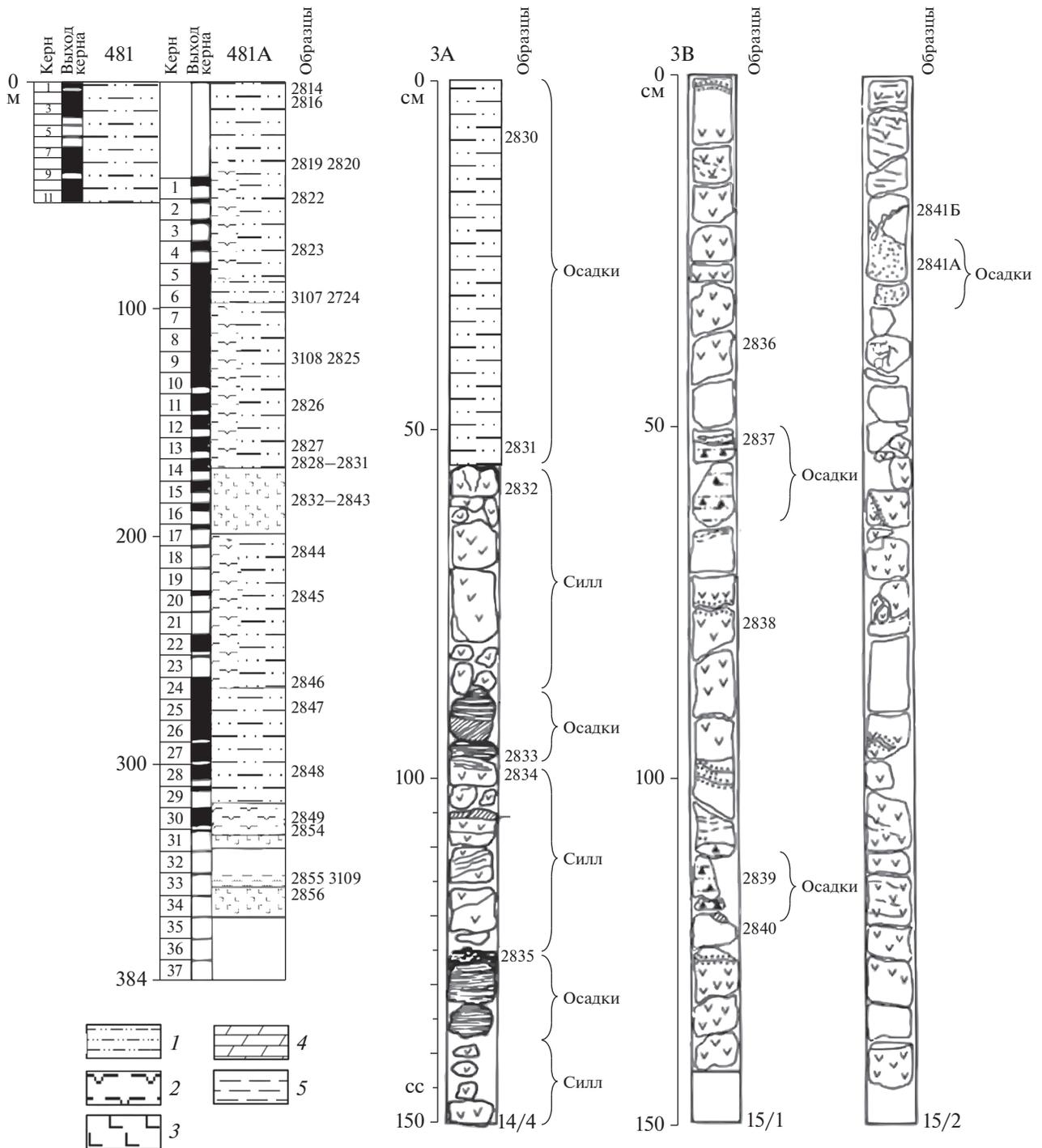
Образец	Осадки	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Z-2814	1	15.0	33.7	3.6	14.2	2.8	0.59	2.4	0.38	2.2	0.45	1.4	0.19	1.3	0.20
Z-2816	1	17.5	38.6	4.2	16.5	3.2	0.69	2.9	0.45	2.6	0.53	1.6	0.23	1.5	0.24
Z-2819	1	16.2	36.7	4.0	15.4	3.1	0.67	2.7	0.42	2.5	0.50	1.5	0.22	1.5	0.23
Z-2820	1	15.4	33.5	3.8	15.2	3.1	0.67	2.7	0.42	2.4	0.51	1.5	0.22	1.4	0.22
Z-2822	1	30.2	59.3	6.4	25.2	4.9	1.2	4.1	0.65	3.7	0.72	2.2	0.30	2.1	0.31
Z-2823	1	32.6	67.8	7.1	27.4	5.4	1.2	4.5	0.70	3.9	0.80	2.4	0.34	2.2	0.33
Z-3107	1	29.4	60.4	7.0	27.4	5.3	1.2	4.9	0.72	4.1	0.82	2.4	0.35	2.4	0.35
Z-2824	1	31.2	58.8	6.6	25.9	5.0	1.2	4.2	0.64	3.7	0.72	2.2	0.31	2.1	0.31
Z-3108	1	17.5	40.4	4.3	16.9	3.3	0.72	3.1	0.47	2.7	0.56	1.7	0.25	1.7	0.26
Z-2825	1	18.1	41.5	4.4	16.7	3.3	0.7	2.9	0.46	2.60	0.53	1.6	0.23	1.6	0.24
Z-2826	2	31.6	63.3	6.9	26.3	5.1	1.1	4.4	0.67	3.9	0.77	2.3	0.33	2.2	0.32
Z-2827	2	34.0	63.0	7.1	27.0	5.1	1.1	4.4	0.65	3.8	0.74	2.2	0.32	2.1	0.32
Z-2828	2	30.6	55.4	6.0	22.9	4.2	1.0	3.6	0.52	2.9	0.58	1.7	0.25	1.7	0.25
Z-2829	2	36.7	74.0	7.9	30.2	5.9	1.3	5.2	0.77	4.4	0.87	2.5	0.36	2.4	0.37
Z-2830	2	35.1	65.8	7.3	27.8	5.3	1.3	4.7	0.70	3.9	0.80	2.3	0.32	2.2	0.33
Z-2831	2	30.4	62.6	6.6	26.4	5.4	1.4	5.3	0.81	4.8	0.97	2.8	0.41	2.7	0.40
Z-2833	4	43.6	84.3	9.2	36.1	7.1	1.6	6.2	0.93	5.2	1.04	2.9	0.40	2.8	0.41
Z-2835	4	39.0	75.1	8.6	33.0	6.4	1.5	5.7	0.85	4.7	0.94	2.7	0.38	2.6	0.39
Z-2837	4	33.3	62.9	7.2	27.8	5.4	1.3	4.8	0.71	4.0	0.81	2.3	0.33	2.2	0.33
Z-2839	4	33.9	64.1	6.9	26.5	5.0	1.2	4.5	0.67	3.7	0.75	2.2	0.31	2.1	0.31
Z-2844	3	30.9	60.8	6.5	25.3	4.8	1.1	4.3	0.61	3.6	0.72	2.1	0.30	2.1	0.30
Z-2845	1	31.2	64.6	6.7	25.7	5.0	1.1	4.5	0.66	3.8	0.77	2.2	0.32	2.1	0.32
Z-2846	1	32.5	66.1	6.7	25.6	4.9	1.1	4.4	0.66	3.8	0.74	2.2	0.32	2.1	0.31
Z-2847	1	36.9	74.0	8.0	30.3	5.9	1.2	5.2	0.78	4.4	0.87	2.6	0.37	2.5	0.36
Z-2848	1	36.8	75.0	7.8	30.1	5.9	1.3	5.2	0.77	4.4	0.89	2.6	0.37	2.5	0.37
Z-2849	1	26.4	56.7	5.5	21.6	4.3	0.94	3.76	0.57	3.29	0.67	2.0	0.28	1.9	0.29
Z-2854	1	35.7	70.2	7.7	29.7	5.8	1.2	5.05	0.74	4.36	0.84	2.5	0.35	2.4	0.36
Z-2855	2	29.5	61.7	6.1	23.2	4.6	1.0	4.20	0.63	3.71	0.75	2.3	0.32	2.1	0.31
Z-3109	2	25.6	53.9	5.8	22.2	4.4	0.93	4.1	0.61	3.5	0.72	2.2	0.31	2.2	0.33

изменения. Соответственно эта зона реально занимает меньший интервал разреза, в пределах ~160–170.55 м, чем ранее была выделена [8].

Во всех образцах осадков из зоны над комплексом силлов изменение части макроэлементов похоже на их изменение в осадках, заключенных между силлами (рис. 3б, см. рис. 3а). Прежде всего, это относится к значительному уменьшению в них содержания  $C_{орг}$ . Также уменьшилось содержание Mn, но в меньшей степени. Содержа-

ние Ti, Fe, Mg слабо увеличилось, так же, как в осадках из комплекса силлов.

Из микроэлементов, содержание которых существенно уменьшилось в осадках, чередующихся с силлами (Cu, As, Mo, Ag, Cd, Sb, Bi), (см. рис. 4а), в осадках над комплексом силлов их содержание также уменьшилось, кроме Ag, но значительно слабее (см. рис. 4б). Содержание Li, Pb уменьшилось аналогично уменьшению их содержания в осадках между силлами. Уменьшение содержа-

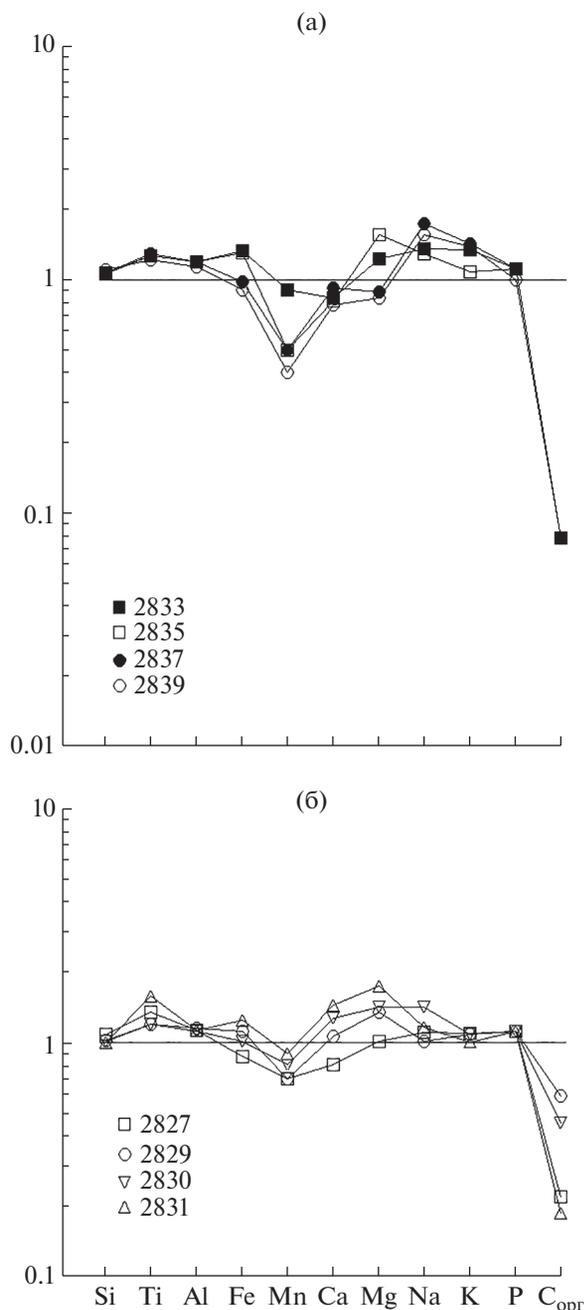


**Рис. 2.** Литологическая колонка скв. 481А; зоны контактов силлов и осадков; 3А (кern 14, секция 4), 3В (кern 15, секция 2) по [6] с изменениями.

1 – алевриты/алевролиты; 2 – диатомовый ил; 3 – базальтовый силл; 4 – доломит; 5 – глины/аргиллиты.

ния Ni, Cu, Zn, Sb, Bi, U слабо проявлено. Непосредственно на контакте с силлом (образцы 2830, 2831) степень уменьшения содержания Li, Cd, Cs, Bi возросла по сравнению с осадками, более удаленными от силла (образцы 2827, 2829). В отличие от осадков, чередующихся с силлами, в осадках над

комплексом силлов увеличилось содержание Ag. Кроме того, в образце 2831, который находится прямо на кровле силла, увеличилось содержание Sc, V, Cr, Co, Ni. Содержание РЗЭ в осадках над комплексом силлов практически осталось таким, как в неизмененных осадках (см. рис. 5б).



**Рис. 3.** Содержание макроэлементов и  $C_{орг}$  в измененных осадках из скв.481А. Нормировано по среднему составу неизмененных осадков; (а) — осадки внутри комплекса тонких силлов; (б) — осадки на контакте с кровлей комплекса силлов.

Таким образом, изменение химического состава осадков, расположенных над комплексом тонких силлов, в основном похоже на изменение химического состава осадков, запечатанных между силлами в комплексе тонких силлов, но проявлено для большинства элементов значительно слабее, кроме Li, Pb, степень уменьшения их содержания в тех и других осадках одинаковая.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Влияние силлов на изменение содержания макроэлементов в осадках

В осадках из зон контактов с силлами изменение содержания большинства макроэлементов не произошло или проявилось слабо.

В осадках, которые находятся внутри комплекса тонких силлов, наиболее заметно уменьшилось только содержание Mn. Содержание Ti, Na увеличилось слабо. В отдельных образцах увеличилось незначительно содержание Fe, Mg, K. В осадках над этим комплексом силлов, на контакте с ним, изменение содержания макроэлементов похоже на их содержание в осадках, чередующихся с силлами в комплексе силлов с некоторыми отклонениями. В них уменьшение содержания Mn проявлено слабо, не произошло увеличение содержания K, но в отдельных образцах, расположенных наиболее близко к кровле силла, увеличилось содержание Ca (см. рис. 3а, 3б).

Тонкие силлы, которые внедрились в осадочный покров одновременно или последовательно, относительно быстро остывали. Соответственно разогретые ими осадки с высоким содержанием морской воды также быстро остывали. В результате, в кратковременных гидротермальных системах в процессе взаимодействия вода-осадки сильного изменения содержания макроэлементов не происходило, в отличие от долгоживущих гидротермальных систем, в которых установлено интенсивное изменение содержания многих макроэлементов в гидротермально измененных осадках, как было показано при изучении скв. 477А, пробуренной в южном трюге во впадине Гуаймас в районе с высоким тепловым потоком [1, 2].

В то же время, это обстоятельство в данном случае не указывает на неподвижность или слабую подвижность макроэлементов, так как процесс перераспределения элементов происходит внутри осадков и соответственно без изменения химического состава осадков в целом. Так осадки, чередующиеся с силлами в комплексе силлов, и осадки из зоны их контакта с кровлей силла, окремнены. Окремнение произошло при растворении диатомовых, которыми обогащены исходные осадки во впадине Гуаймас. В результате опал А преобразовался в опал С-Т и кварц. Кроме того, частичное растворение захватило терригенный кварц. Таким образом, перераспределение кремнезема внутри осадков очевидно, а изменения его содержания в них нет. В процессе растворения/отложения, в котором участвуют терригенные глинистые минералы, также происходит перераспределение макроэлементов в осадках. В этом случае также нет существенного изменения в осадках содержания макроэлементов, входящих в состав глинистых минералов.

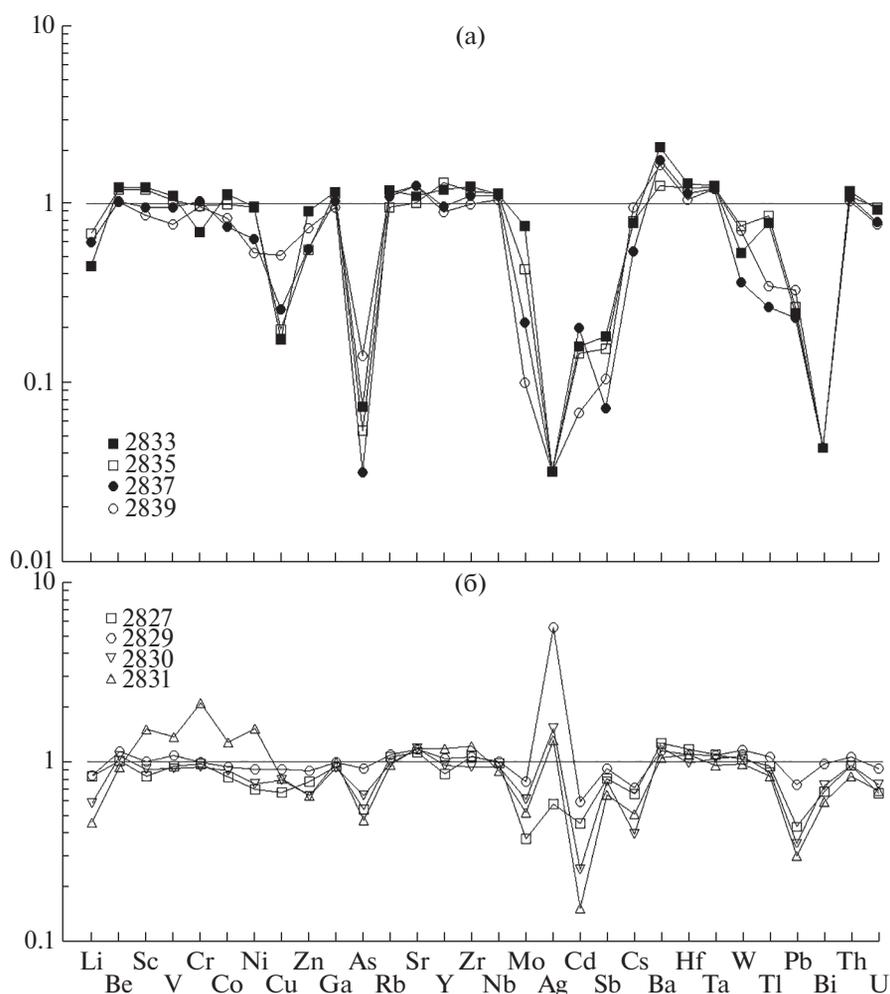


Рис. 4. Содержание микроэлементов в измененных осадках из скв. 481А. Нормировано по среднему составу неизмененных осадков. (а) и (б) – см. рис. 3.

#### Влияние силлов на изменение содержания микроэлементов в осадках

Самое сильное изменение содержания микроэлементов установлено в осадках, которые чередуются с силлами в комплексе тонких силлов. В них наиболее существенно уменьшилось содержание Li, Cu, As, Mo, Ag, Cd, Sb, Ta, W, Tl, Pb, Bi (см. рис. 4а). Одновременно в этих осадках произошло сильное уменьшение содержания  $C_{орг}$  (см. рис. 3а), что указывает на связь микроэлементов с органическим веществом. Уменьшение содержания  $C_{орг}$  в термально измененных осадках, заключенных в комплексе силлов, сопровождается и потерей содержащихся в них микроэлементов. В то же время, неясно, куда они мигрировали, так как каждый слой осадков заблокирован сверху и снизу силлами, что препятствует выходу растворов за их пределы. Можно допустить, что трансформированные растворы, получившие эти микроэлементы при изменении осадков, прони-

кали по трещинам в осадки над комплексом силлов. Но в осадках из зоны контакта с кровлей этого комплекса силлов нет увеличения содержания тех микроэлементов, содержание которых сильно уменьшилось в осадках, чередующихся с силлами (см. рис. 4б). Более того, уменьшение содержания ряда микроэлементов повторяет уменьшение содержания этих элементов в осадках из комплекса силлов, но слабо проявлено. Только содержание Ag зеркально увеличилось в осадках над силлом при уменьшении его содержания в отдельных образцах осадков, заключенных в комплексе силлов.

Во всех осадках, испытавших воздействие силлов, содержание РЗЭ не изменилось по сравнению с их содержанием в неизмененных осадках или проявилось слабо. Это относится к осадкам, которые находятся внутри комплекса тонких силлов (см. рис. 5а) и над ним (на контакте с его кровлей), (см. рис. 5б).

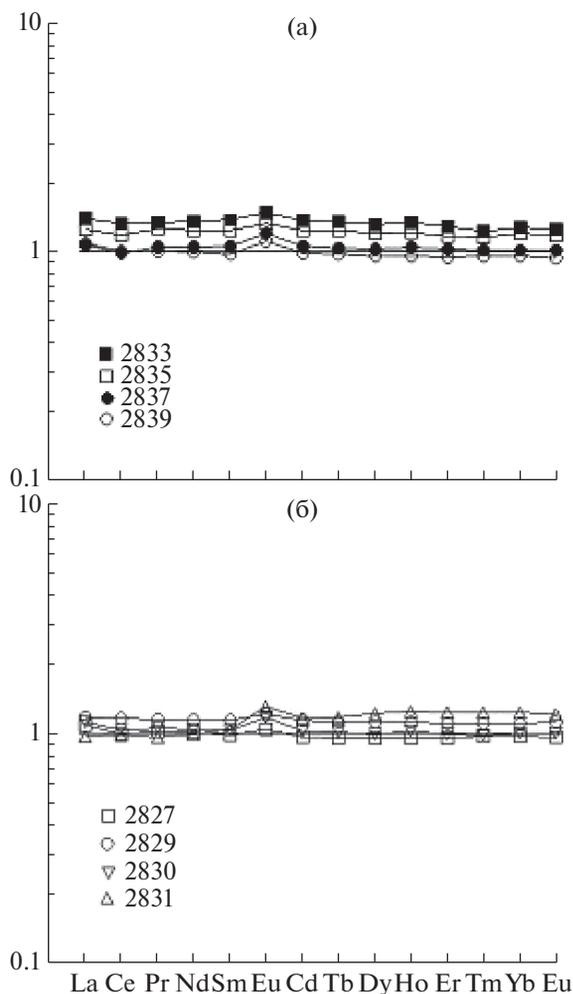


Рис. 5. Содержание РЗЭ в измененных осадках из скв. 481А. Нормировано по среднему составу неизмененных осадков. (а) и (б) – см. рис. 3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение химического состава верхнеплейстоценовых осадков (турбидитов, переслаивающихся с гемипелагическими осадками) из зон контактов с силлами во впадине Гуаймас Калифорнийского залива заключается в следующем:

1. В осадках, которые расположены внутри комплекса тонких силлов и над ним, для большинства макроэлементов изменение их содержания не произошло или проявилось слабо. В то же время, в данном случае это обстоятельство не указывает на неподвижность или слабую подвижность макроэлементов, так как процесс перераспределения элементов происходит внутри осадков и, соответственно, без изменения химического состава осадков в целом. Это связано с процессом растворения/отложения, в котором участвуют, прежде всего, диатомовые, опал С-Т, кварц, в котором содержание Si в кремнистых осадках из

термально измененных зон остается таким, как в исходных неизмененных осадках, а также глинистые минералы.

2. Для осадков, измененных под воздействием тепла силлов, характерным является уменьшение в них содержания  $C_{\text{орг}}$ . Особенно интенсивно это проявилось в осадках, заключенных в комплексе тонких силлов, в которых произошло самое заметное уменьшение содержания микроэлементов (Li, Cu, As, Mo, Ag, Cd, Sb, Ta, W, Tl, Pb, Bi).

3. Во всех осадках из зон контактов с силлами содержание РЗЭ не изменилось по сравнению с их содержанием в неизмененных осадках или проявилось слабо.

4. Полученные результаты показывают изменение химического состава осадков из зон контактов с силлами во впадине Гуаймас Калифорнийского залива, для которого характерно накопление с большой скоростью мощных толщ осадков с высоким содержанием морской воды и внедрением в них базальтовых силлов, сопровождаемых формированием гидротермальных систем. Проведенное исследование расширяет наши знания о процессах, происходящих и происходивших на начальных этапах формирования океанов в результате рифтинга континентальных окраин, в данном случае, представление об изменении химического состава осадков под влиянием внедрившихся в них силлов.

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

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного плана научно-исследовательских работ, № 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. Курносое В.Б., Блинова Е.В. Гидротермальные изменения осадков и трансформация состава растворов во впадине Гуаймас Калифорнийского залива // Докл. РАН. 2015. Т. 461. № 2. С. 197–200.
3. Курносое В.Б., Сахаров Б.А., Блинова Е.В. Глинистые минералы в осадках гидротермально активного южного трого впадины Гуаймас, Калифорнийский залив // Литология и полезные ископаемые. 2016. № 4. С. 287–306.
4. Курносое В.Б., Сахаров Б.А., Гептнер А.Р. и др. Глинистые минералы верхнеплейстоценовых осадков из зон контактов с базальтовыми силлами (северный трог впадины Гуаймас, Калифорнийский залив, скважина 481/481А) // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 4.

5. Курносое В.Б., Сахаров Б.А., Гептнер А.Р. и др. Глинистые минералы в осадках центральной части впадины Гуаймас, Калифорнийский залив, скважина 478 // Тихоокеанская геология. 2019. (в печати).
6. Curray J.R., Moore D.G. et al. Init. Repts. DSDP. 64. Pt. 1. // Washington: U.S. Govt. Printing Office. 1982. 507 p.
7. 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.
8. Kastner M. Evidence for two distinct hydrothermal systems in the Guaymas Basin // Init. Repts. DSDP. 1982. V. 64. Part 2. P. 1143–1158.
9. Larson R.L. Bathymetry, magnetic anomalies, and plate tectonic history of the mouth of the Gulf of California. Bull // Geol. Soc. Am. 1972. V. 83. P. 3345–3360.
10. Lawver L.A., Williams D.L. Heat flow in the central Gulf of California // J. Geophys. 1979. V. 84. P. 3465–3478.
11. Lewis B.T.R., Robinson P. Init. Repts. DSDP. 1983. V. 65. 752 p.
12. 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.
13. Moore D.G. Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California structural province // Geol. Soc. Am. Bull. 1973. № 84. P. 1883–1906.
14. Niemitz J. Geochemistry of sediments, Leg 64, Gulf of California // Init. Repts. DSDP. 1982. V. 64. Part 2. P. 695–716.
15. 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. № 84. P. 6757–6796.

## Hydrothermal Altered Sediments from Contact Zones with Sills in North Trough of the Guaymas Basin, Gulf of California

E. O. Goncharov<sup>a, #</sup>, V. B. Kurnosov<sup>a, ##</sup>, Yu. I. Konovalov<sup>a</sup>, A. R. Geptner<sup>a</sup>, K. R. Galin<sup>a</sup>, N. N. Ignatyev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Geologicheskiiy institute RAS, Moscow, Russia

<sup>#</sup>e-mail: zevs159357@list.ru

<sup>##</sup>e-mail: vic-kurnosov@rambler.ru

Chemical composition of the Upper Pleistocene sediments (turbidites interbedded with hemipelagic sediments) from contact zones with basalt sills in the Guaymas Basin, Gulf of the California (DSDP Hole 481A), was studied by the methods of XRF and ICP-MS. Alteration for most macroelements in these sediments is not or slightly. This is not indicates immobility or slightly mobility of these elements, as a process of a distribution of elements occurs inside of sediments without a change their bulk chemical compositions at dissolution/deposition process, in which primary diatoms, opal C-T, quartz, and clay minerals. In results, as a whole there is no change in the content of macroelements in sediments. Whereas, the contents C<sub>org</sub>, Li, Cu, As, Mo, Ag, Cd, Sb, Ta, W, Tl, Pb, Bi strongly decrease in altered sediments from contact zones with sills.

**Keywords:** Gulf of California, Guaymas Basin, hole, chemical composition