

**ГЛИНИСТЫЕ МИНЕРАЛЫ В ВЕРХНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОСАДКАХ ИЗ ЦЕНТРА
ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, СКВАЖИНА ODP 1036A, СРЕДИННАЯ ДОЛИНА,
ХРЕБЕТ ХУАН ДЕ ФУКА, ТИХИЙ ОКЕАН**

В.Б. Курносое¹, Б.А. Сахаров¹, И.А. Морозов², Д.М. Коршунов¹

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия; e-mail: vic-kurnosov@rambler.ru, sakharovba@gmail.com

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 апреля 2024 г.

Методом моделирования рентгеновских дифракционных картин изучены глинистые минералы в верхнеплейстоценовых осадках из скважины ODP 1036A, которая пробурена до глубины 38.50 м в 9 м от гидротермального источника с температурой 268 °С на гидротермальном поле «Мертвая собака» (северная часть Срединной Долины хребта Хуан де Фука). В разрезе осадков из скважины 1036A терригенные глинистые минералы сохранились в интервале глубин от 6.10 м до 10.04 м в условиях низкой температуры ~17 °С. Они состоят из диоктаэдрических смектита, смешанослойного смектит-иллита, иллита и триоктаэдрического хлорита. В интервале глубин от 10.04 м до ~20 м при температуре от ~112 °С до 200 °С вместо терригенных глинистых минералов сформировался триоктаэдрический смешанослойный хлорит-смектит. В нижней половине разреза осадков из скважины 1036A, в интервале глубин 20–38.50 м при температуре от 200 °С до 330 °С сформировался триоктаэдрический хлорит-корренсит, а в самом низу разреза – хлорит.

Ключевые слова: глинистые минералы, гидротермальное поле, глубоководное бурение, хребет Хуан де Фука, Тихий океан.

Океанические спрединговые хребты, находящиеся около континентов, перекрыты четвертичными осадками мощностью в сотни метров. В осевых долинах этих хребтов конвективные гидротермальные системы, в которых рудообразующие растворы разгружаются на дне в виде гидротермальных источников, охватывают, кроме кристаллического фундамента, также и осадочный покров. На сегодняшний день в Мировом океане есть только один такого рода объект, в котором пробурены глубоководные скважины рядом с высокотемпературными гидротермальными источниками. Это гидротермальное поле «Мертвая собака» в северной части Срединной Долины хребта Хуан де Фука (северо-восточный сектор Тихого океана, около Северо-Американского континента). На нем пробурены около гидротермальных источников скважины ODP 858B и 1036A глубиной 38.60 м и 38.50 м, на расстоянии 75 м друг от друга. Скважина 1036A расположена в 9 м от гидротермального источника с температурой 268 °С. Скважина 858B пробурена в 20 м от другого гидротермального источника с температурой 276 °С.

Статья представляет результаты изучения глинистых минералов в верхнеплейстоценовых осадках из скважины 1036A методом моделирования экспериментальных рентгеновских дифракционных картин, полученных от препаратов с ориентированными частицами < 0.001 мм, насыщенных этиленгликолем. Эти результаты включают фазовый состав, структурные параметры и количественные соотношения глинистых минералов, последовательность их формирования. В статье также рассмотрены сходства и различия глинистых минералов в осадках из скважин 1036A и 858B.

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

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Срединная Долина хребта Хуан де Фука является тектоно-магматической структурой среднескоростного спрединга (58 мм/год) [7]. В северной части Сре-

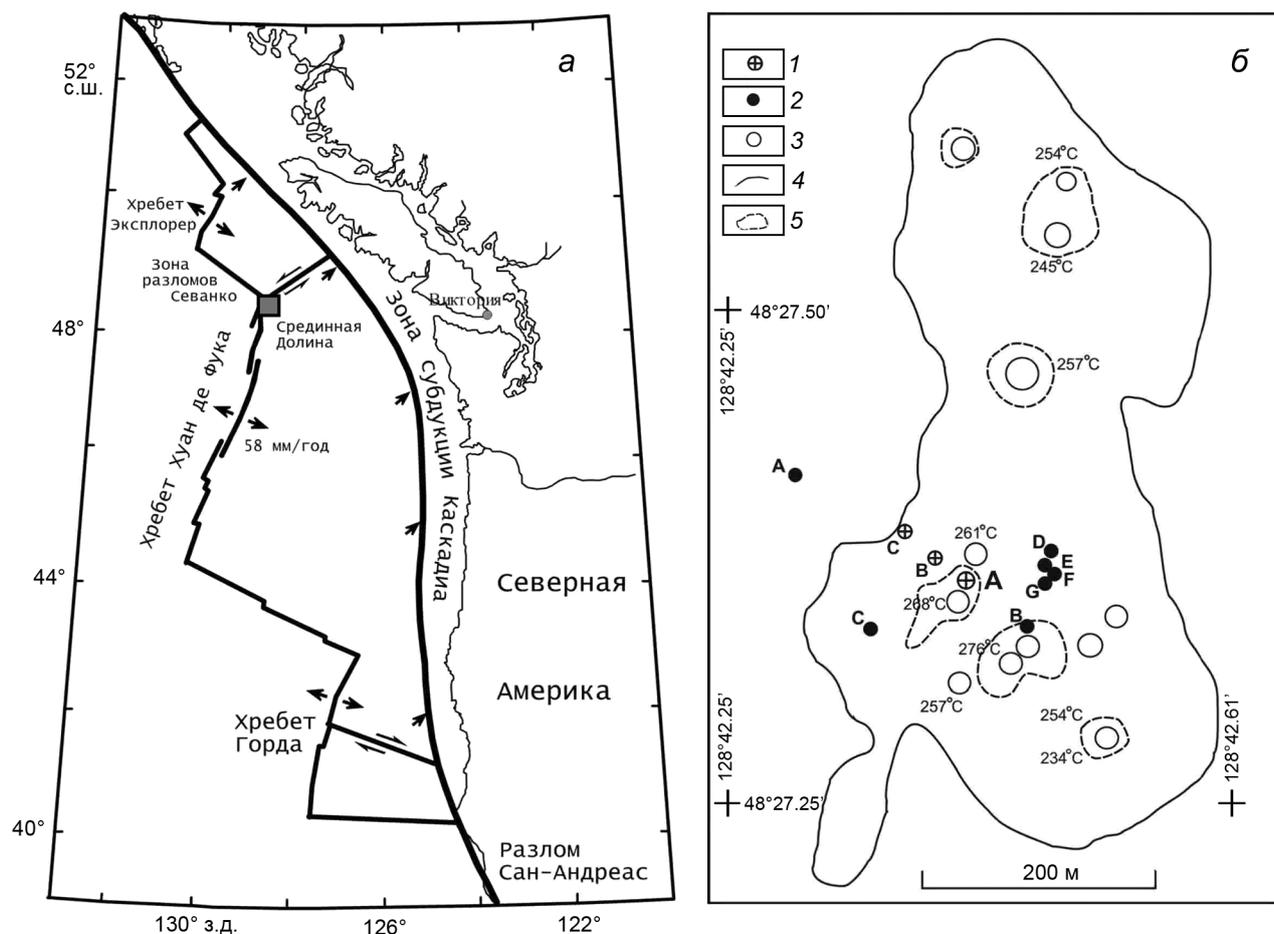


Рис. 1. Структурно-тектоническая схема Срединной Долины хребта Хуан де Фука в северо-восточной части Тихого океана [7].

Серым квадратом показан район исследований, помещенный на рис. 1, б, стрелки показывают направление движения плит (а); расположение скважин и гидротермальных источников в районе гидротермального поля «Мертвая собака» [7, 12] (б); 1 – скважины ODP 1036A, B, C (рейс ODP 169), скважина 1036A выделена буквой «А»; 2 – скважины ODP 858A, B, C, D, F, G (рейс ODP 139); 3 – гидротермальные источники; 4 – контур гидротермального поля; 5 – граница гидротермальных отложений.

динной Долины находится гидротермальное поле «Мертвая собака» размером 800×400 м с высоким тепловым потоком (до 835 мВт/м^2), на котором расположены гидротермальные источники с температурой от 234°C до 276°C [7, 8] (рис. 1). В районе гидротермального поля накопилось ~ 300 м верхнеплейстоценовых гемипелагических осадков с редкими прослоями дистальных турбидитов [7]. На гидротермальном поле была пробурена серия скважин на разном удалении от гидротермальных источников [7, 12].

Скважина 1036A, в осадках из которой проведено изучение глинистых минералов, расположена наиболее близко к гидротермальному источнику с температурой 268°C , в ~ 9 м от него (рис. 1). Она пробурена до глубины 38.50 м (рис. 2) через толщу воды

в 2407 м. В скважине 1036A на глубине 20 м замерена температура 200°C [12].

Участники рейса ODP 169 выделили в разрезе осадков из скважины 1036A Толщи IA, IB, IC, IIС, IV [12]. Толща I, которая состоит из неизменных фоновых терригенных осадков, изучена в референтных скважинах ODP 855A, C, D [7], пробуренных в подножии восточного крутого склона Срединной Долины.

Краткое описание осадков сделано участниками рейса ODP 169 на борту бурового судна «JOIDES Resolution» при визуальном описании керна и изучении в оптическом микроскопе.

Толща IV (0–6.10 м) сложена обломками обрушающейся сульфидной трубы расположенной рядом «черного курильщика». Отложения Толщи IV подстилаются осадками Толщи IA.

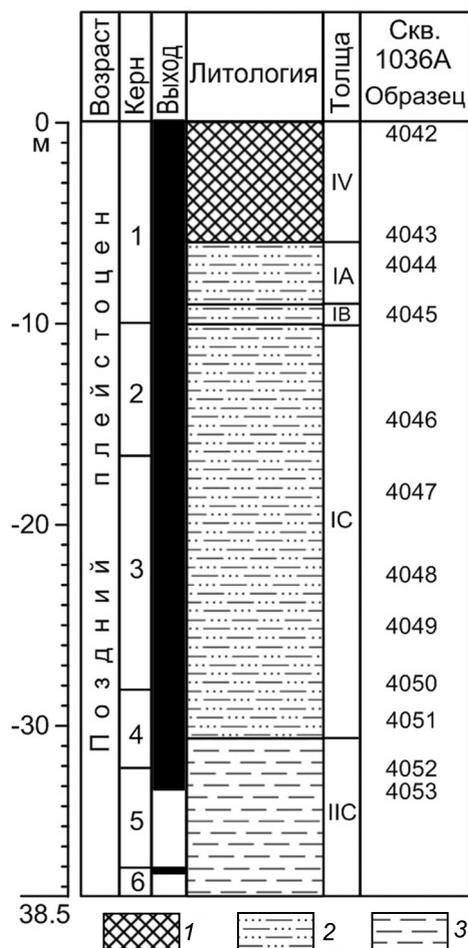


Рис. 2. Литологическая колонка скважины ODP 1036A [12] с расположением образцов.

1 – сульфидный делювий (обломки обрушения сульфидной трубы действующего «черного курильщика»); 2 – алеврито-глинистые гемипелагические осадки, переслаивающиеся с мелко-тонкозернистыми турбидитами; 3 – гемипелагические глины.

Толща IA (6.10–9.20 м) состоит из неизменных или слабо измененных гемипелагических алевритовых глин с несколькими тонкими прослоями алевритов. Алевритовые осадки состоят в основном из глинистых минералов с небольшой примесью кальцита, а также содержат примесь кварца, полевых шпатов, роговой обманки, пироксена, эпидота и пирита.

Толща IB (9.20–10.04 м) – алевритовая гемипелагическая глина с карбонатными конкрециями и карбонатным цементом.

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

Толща IIC (30.70–38.50 м) представлена гемипелагическими осадками с тонкими прослоями мелко-тонкозернистых турбидитов (измененные аргиллиты,

алевролиты и пески, присутствуют ангидритовый цемент и ангидритовые конкреции, а также карбонатные конкреции).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ориентированные препараты фракции < 0.001 мм осадков для рентгеновской съемки были приготовлены осаждением суспензии на предметные стекла размером 3.8 × 2.4 см. Рентгеновское изучение этих препаратов проведено на дифрактометре D8 Advance Bruker на $\text{CuK}\alpha$ излучении в два этапа. Вначале препараты всех образцов были сняты со скоростью $2^\circ 2\theta$ в минуту в интервале углов 2.0° – $32^\circ 2\theta$ (экспресс-съемка) в воздушно-сухом состоянии, насыщенные этиленгликолем в эксикаторе при температуре 60°C в течение суток и прогретые при 550°C в течение 2-х часов. Затем было проведено компьютерное моделирование экспериментальных дифракционных картин, полученных от препаратов, насыщенных этиленгликолем. Компьютерное моделирование экспериментальных дифракционных картин [11, 17] проведено с использованием программ Б.А. Сахарова и А.С. Наумова, основанных на математических алгоритмах [3, 10, 18].

В статье использованы обозначения смешанослойных минералов, таких как смектит-иллит, слюда-смектит, хлорит-смектит, хлорит-корренсит и т.д., где на первом месте стоит название преобладающих в структуре типов слоев.

Петрографические шлифы просмотрены в оптическом микроскопе VIOptic VP-100. Отдельные шлифы дополнительно изучены в оптических микроскопах Axioskop 40 Carl Zeiss и Olympus BX-51.

Количественный рентгенофазовый анализ минерального состава осадков из скважины 1036A проведен с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima-IV (Япония). Конфигурация дифрактометра: $\text{CuK}\alpha$ излучение, Ni-фильтр, детектор D/Tex-Ultra, диапазон углов съемки 3° – $65^\circ 2\theta$. Оптимальная навеска образца для анализа 600 мг. Количественный фазовый состав рассчитывался в соответствии с рекомендациями [15] по методу Ритвельда [16] с использованием программного обеспечения PROFEX для BGMN [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты петрографического и гранулометрического изучения осадков

По результатам гранулометрического анализа и просмотра в оптическом микроскопе шлифов осадков из скважины 1036A все валовые образцы, из которых изучены глинистые минералы во фракции < 0.001 мм, относятся к алевритовым глинам и глинистым алевритам, реже – к песчано-алевритовым глинам и алев-

Таблица 1. Породы, из которых отобраны образцы для изучения глинистых минералов, скважина 1036А.

Порода	Образец	Керн-секция, интервал (см)	Глубина отбора образцов ниже поверхности дна, м	Толща	Интервал глубин в скважине, занимаемый толщей, м
Глинистый алеврит	4042	1Н-1, 0–10	0.00	IV	0–6.10
Алевритовая глина	4044	1Н-5, 80–90	6.80	IA	6.10–9.20
Алевритовая глина	4045	2Н-1, 0–10	9.50	IB	9.20–10.04
Алевритовая глина	4046	2Н-4, 85–89	14.85	IC	
Глинистый алеврит	4047-1	2Н-7, 0–10	18.50	верхняя часть	10.04–20
Алевритовая глина	4048	3Н-3, 60–70	22.60	IC	
Песчано-алевритовая глина	4049	3Н-5, 0–10	25.00		20–30.70
Алевритовая глина	4050	3Н-7, 10–20	28.10	нижняя часть	
Песчано-алевритовая глина	4051	4Н-1, 130–140	29.80		
Алеврит	4052-1	4Н-4, 40–47	31.90	IIС	
Глинистый алеврит	4053	5Х-СС, 7–13	33.07		30.70–38.50

риту (табл. 1). В изученных образцах осадков, кроме глинистых минералов, присутствуют в виде примеси обломочные зерна кварца и плагиоклаза, отдельные пластинки мусковита, встречаются зерна амфиболов, пироксена и эпидота.

Результаты рентгеновского изучения глинистых минералов

Результаты моделирования дифракционных картин, полученных от ориентированных препаратов фракции < 0.001 мм, насыщенных этиленгликолем, позволили выделить Группы 1, 2, 3, 4, которые объединяют образцы по составу глинистых минералов. Наиболее представительные экспериментальные дифрактограммы образцов этих Групп, а также образца Группы 4, и рассчитанные дифракционные картины показаны на рис. 3.

Группа 1 объединяет образцы 4044 и 4045, характеризующие глинистые минералы в осадках Толщи IA и Толщи IB, которые занимают в скважине 1036А интервал от 6.10 м до 10.04 м (рис. 1). Эти образцы состоят из диоктаэдрических смектита (27.4 % и 30.5 %), неупорядоченного смешанослойного смектит-иллита (37.6 % и 32.1 %), иллита (11.6 % и 12.1 %) и триоктаэдрического хлорита (23.4 % и 25.3 %) (табл. 2). Глинистые минералы похожи на терригенные глинистые минералы, изученные в образцах 2857 и 2862 из референтных скважин 855А и 855С, которые состоят в основном также из диоктаэдрических смектит-иллита (41 % и 29.7 %), иллита (33.2 % и 31.1 %) и триоктаэдрического хлорита (25.8 % и 39.2 %) [4].

Основное различие глинистых минералов в осадках из скважины 1036А и из скважин 855А, С состоит в том, что среди глинистых минералов в образцах 4044 и 4045 есть диоктаэдрический смектит, в

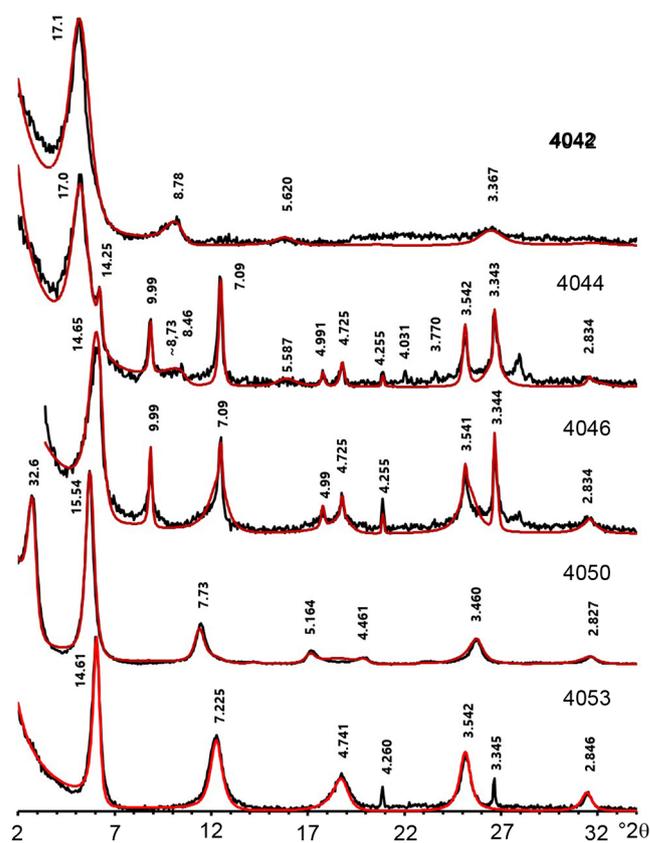


Рис. 3. Экспериментальные дифрактограммы (черные линии) образцов сравниваются с рассчитанными дифракционными картинами (красные линии).

Образцы: 4042 (Группа 4, Толща IV), 4044 (Группа 1, Толща IA), 4046 (Группа 2, Толща IC – нижняя часть), 4050 (Группа 3а, Толща IC – верхняя часть), 4053 (Группа 3б, Толща IIС). На дифрактограммах межплоскостные расстояния в Å.

Таблица 2. Глинистые минералы (скважина 1036А), их содержание в образце (в %) и структурные параметры смешанослойных фаз, полученные методом моделирования дифракционных картин.

Образец	Толща	Группа, объединяющая образцы по составу глинистых минералов	Смектит (диокт)		Смектит-иллит (диокт)		Хлорит-смектит (триокт)		Хлорит (триокт)	Иллит (диокт)	Хлорит-корренсит (триокт)
			%	Нс:Ни = Wс:Wi	%	Нс:Ни = Wс:Wi	%	Нх:Нк = Wх:Wк			
4042	IV	4	—	16.85:9.98 = 0.85:0.15	100	—	—	—	—	—	—
4044	IA	1	27.4	16.75:9.98 = 0.5:0.5	37.6	—	23.4	11.6	—	—	—
4045	IB	—	30.5	16.75:9.98 = 0.5:0.5	32.1	—	25.3	12.1	—	—	—
4046	IC	2	—	—	—	14.17:16.85 = 0.9:0.1	78.2	6.7	15.1	—	—
4047-1	верхняя часть	—	15.6	—	—	14.17:16.85 = 0.95:0.05	65.9	—	18.5	—	—
4048	IC	3а	—	—	—	—	—	—	—	—	14.22:31.0 = 0.6:0.4, 0.75
4049	нижняя	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.22:31.0 = 0.55:0.45, 0.85
4050	часть	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.22:31.1 = 0.5:0.5, 0.8
4051	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.0:31.15 = 0.51:0.49, 0.8
4052-1	IC	3б	—	—	—	—	—	—	28.9	—	14.22:31.15 = 0.89:0.11
4053	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.24:31.15 = 0.89:0.11

то время как он отсутствует в образцах 2857 и 2862. Кроме того, в структуре смешанослойного смектит-иллита (образцы 2857 и 2862, скважины 855А и 855С) находятся слои вермикулита, которых нет в структуре смектит-иллита в образцах 4044 и 4045 (скважина 1036А). Эти различия можно объяснить тем, что из многочисленных источников осадочного материала Северо-Американского континента в северо-восточную часть Тихого океана, и в конечном итоге в Срединную Долину хребта Хуан де Фука, поступает в целом однообразный набор глинистых минералов, но с некоторыми различиями в их структуре.

Группа 2 объединяет образцы 4046 и 4047-1 из верхней части Толщи IC, которая находится в интервале 10.04–20 м (рис. 1). Моделирование дифракционных картин этих образцов (табл. 2) показало, что главное их отличие от образцов из Группы 1 состоит в том, что в образцах Группы 2 отсутствует терригенный смешанослойный диоктаэдрический смектит-иллит. Вместо него сформировался триоктаэдрический хлорит-смектит (78.2 % и 65.9 %), в котором хлоритовые слои существенно преобладают над смектитовыми ($W_x:W_c = 0.9:0.1$, образец 4046) и ($W_x:W_c = 0.95:0.05$, образец 4047-1). В образовании триоктаэдрического хлорит-смектита участвовали также терригенные смектит и хлорит. Этот вывод сделан на основании того, что в образце 4047-1 Группы 2 содержание терригенного смектита уменьшилось примерно в два раза, а в образце 4046 он исчез. В то же время содержание терригенного хлорита в образце 4046 уменьшилось в четыре раза, а в образце 4047-1 хлорита нет. В образцах Группы 2 сохранился терригенный иллит из Группы 1 без изменения его количества.

Группа 3 объединяет образцы 4048–4053, разделенные на две подгруппы (табл. 2).

Подгруппа 3а объединяет образцы 4048–4051, которые характеризуют нижнюю часть Толщи IC (интервал 20–30.70 м) (рис. 1). В ее составе нет глинистых минералов, которые встречены в Группе 1 и 2. Все образцы содержат только новообразованный триоктаэдрический смешанослойный хлорит-корренсит с близким соотношением хлоритовых и корренситовых слоев ($W_x:W_k$, равным 0.5:0.5–0.6:0.4), чередующих-

Примечание к таблице 2. (диокт), (триокт) – обозначение диоктаэдрической и триоктаэдрической фаз, соответственно; – минерал не обнаружен; Нс, Ни, Нх, Нк – высоты (в Å) и Wс, Wi, Wх, Wк – вероятности встречаемости смектитовых, иллитовых, хлоритовых и корренситовых слоев в соответствующих смешанослойных структурах; Ркк – условная вероятность найти корренситовый слой, следующий за корренситовым слоем в смешанослойной структуре хлорит-корренсит.

ся с тенденцией к их сегрегации, определяемой вероятностью встречаемости корренситовых слоев, следующих за корренситовым слоем, $R_{кк} > W_{кк}$, с $R_{кк} = 0.75-0.85$ (табл. 2).

Подгруппа 3б объединяет образцы 4052-1 и 4053, которые находятся в Толще ПС (интервал 30.70–38.50 м), (рис. 1). В Подгруппе 3б так же, как в Подгруппе 3а, нет глинистых минералов, которые встречаются в Группе 1 и 2. Основной новообразованный глинистый минерал, как и в подгруппе 3а, триоктаэдрический неупорядоченный смешанослойный хлорит-корренсит, с тем отличием, что в его структуре существенно преобладают хлоритовые слои над корренситовыми ($W_x:W_k = 0.89:0.11$) (табл. 2). Кроме того, образец 4052-1 содержит тонкодисперсный диоктаэдрический иллит (28.9 %), которого нет в остальных образцах из Групп 3а и 3б (табл. 2).

Моделирование дифракционных картин показало для всех образцов из Группы 3, что они содержат новый триоктаэдрический смешанослойный хлорит-корренсит, который во фракции < 0.001 мм составляет 100 %. Кроме того, моделирование дифракционных картин позволило проследить в структуре хлорит-корренсита изменение соотношения хлоритовых и корренситовых слоев от Подгруппы 3а, в которой в хлорит-корренсите соотношение хлоритовых и корренситовых слоев ($W_x:W_k = 0.5:0.5$ и $0.6:0.4$), до Подгруппы 3б, в которой в хлорит-корренсите соотношение хлоритовых слоев и корренситовых ($W_x:W_k = 0.89:0.11$). Таким образом, наблюдается вниз по разрезу тенденция к формированию хлорита вместо хлорит-корренсита.

Вероятно, что в самой нижней части скважины 1036А, в керне 6 (рис. 2), был сформирован мономинеральный хлорит. Это предположение основано на результатах изучения глинистых минералов из скважины 858В, расположенной недалеко от скважины 1036А, в которой на глубине 38.37 м мономинеральный хлорит составляет 100 % фракции < 0.001 мм [4].

Группа 4. Из самой верхней части Толщи IV (интервал 0–6.10 м), состоящей из обломков разрушения сульфидной трубы «черного курильщика», изучен образец 4042 из поверхностных осадков, из интервала 0–10 см (рис. 2). Сами обломки сульфидной трубы не содержат глинистые минералы. В то же время, присутствие глинистых минералов в отложениях Толщи IV указывает на то, что эти отложения, кроме делювия разрушающейся трубы «черного курильщика», включают металлоносные осадки.

Моделирование дифракционной картины, полученной от ориентированного препарата фракции < 0.001 мм (образец 4042), показало, что новообра-

зованный глинистый минерал состоит на 100 % из диоктаэдрического неупорядоченного смешанослойного смектит-иллита с преобладанием в его структуре смектитовых слоев над иллитовыми ($W_c:W_i = 0.85:0.15$) (табл. 2).

Результаты количественного рентгенофазового анализа валового минерального состава осадков

Этим методом изучены образцы 4044 (Толща IA), 4045 (Толща IB), 4046 и 4047-1 (верхняя часть Толщи IC), 4052-1 и 4053 (Толща ПС).

Минеральный состав терригенных осадков (образцы 4044 и 4045) представлен в основном смектитом (25.4 % и 24.4 %), хлоритом (7.5 % и 6.9 %), иллитом (12.2 % и 12.5 %), плагиоклазом (21.1 % и 16.2 %), кварцем (12.7 % и 13.9 %) и КПШ (6.1 % и 6.2 %).

В образцах 4046 и 4047-1 установлены смешанослойный смектит-иллит, содержание которого в образце 4046 21.3 %, в образце 4047-1 он не обнаружен, хлорит (13.6 % и 11.5 %), иллит (17.2 % и 12.1 %), плагиоклаз (11.2 % и 9.1 %), кварц (24 % и 63.9 %), КПШ в образце 4046 7.8 %, в образце 4047-1 его нет.

Минеральный состав гидротермально измененных осадков нижней части Толщи IC изучен в образцах 4048–4051 только на качественном уровне. Иллит встречен в образцах 4048–4850. КПШ и следы кварца установлены в образцах 4048 и 4049. Плагиоклаз присутствует только в образце 4048.

Минеральный состав гидротермально измененных осадков Толщи ПС (образцы 4052-1 и 4053) состоит в основном из хлорита (19.5 % и 9.6 %), иллита, содержание которого в образце 4052-1 16.4 % (в образце 4053 иллита нет), кварца (57.8 % и 71.9 %). В этих образцах нет плагиоклаза и КПШ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температура образования глинистых минералов

Температурный градиент. Температурный градиент в скважине 1036А такой же, как установленный в скважине 858В (10 °С/м) [6, 13], так как в этих скважинах на одинаковых глубинах температура одинаковая. В скважине 1036А на глубине 20 м инструментально замеренная температура равна 200 °С [12], в скважине 858В на глубине 19.5 м она составляет 197 °С [7]. Кроме того, по данным [14], в скважине 1036А на глубине 21.8 м температура составляет 206 °С и на глубине 27.8 м она равна 268 °С. Разница температуры в 62 °С при разнице глубин ее замера 6 м подтверждает, что температурный градиент в скважине 1036А 10 °С/м.

Температура в Толще IV (0–6.10 м). Металлоносные осадки при их накоплении из раствора гидротермального источника, разгружающегося на дне в 9 м от скважины 1036А, по-видимому, имеют температуру морской воды.

Температура в Толщах IA и IB (6.10–10.04 м). В этом интервале глубин в скважине 1036А температура не была определена. В то же время, в скважине 858В, в интервале глубин 1.97–10.41 м, с неизменными терригенными осадками температура составляет ~17 °С [4]. Учитывая одинаковый фазовый состав терригенных глинистых минералов в осадках из этих двух скважин, состоящий из диоктаэдрических смектита и неупорядоченного смешанослойного смектит-иллита ($W_c:W_i = 0.5:0.5$), а также хлорита и иллита (табл. 2), можно считать, что эта температура ~17 °С характерна и для Толщ IA и IB в скважине 1036А.

Температура в верхней части Толщи IC (10.04–20 м). Температура в верхней части Толщи IC также не была определена. В то же время, в скважине 858В на глубине 16 м рассчитанная температура составляет ~112 °С [4]. С учетом того, что в скважине 1036А температурный градиент такой же, как в скважине 858В, это значение температуры можно отнести и к верхней части Толщи IC из скважины 1036А. Кроме того, в скважине 1036А на глубине 20 м замерена температура 200 °С [12], которая практически такая же, как в скважине 858В, в которой на глубине 19.5 м установлена температура 197 °С [7].

В этом температурном интервале (~112–200 °С) сформировался триоктаэдрический неупорядоченный смешанослойный хлорит-смектит с соотношением в его структуре слоев хлорита и смектита $W_x:W_c = 0.9:0.1–0.95:0.05$. Триоктаэдрический хлорит-смектит, по-видимому, образовался за счет терригенного диоктаэдрического смектит-иллита. В образовании хлорит-смектита возможно участвовали также терригенные хлорит и диоктаэдрический смектит, которые в изученных образцах исчезли, или их содержание сильно сократилось (табл. 2).

Температура в нижней части Толщи IC (20–30.70 м). В скважине 1036А на глубине 21.8 м температура составляет 206 °С и на глубине 27.8 м определена температура 268 °С [14]. Таким образом, температура в нижней части Толщи IC находится в пределах 200–270 °С. При этой температуре исчезли все терригенные глинистые минералы. За их счет сформировался триоктаэдрический смешанослойный хлорит-корренсит с соотношением слоев хлорита и корренсита в его структуре 0.6:0.4 и 0.5:0.5 (табл. 2).

Температура в Толще IIC (30.70–38.50 м). О температуре в этом интервале глубин в скважине 1036А

нет сведений. В то же время, в Толще IID в скважине 858В, пробуренной недалеко от скважины 1036А, в которых одинаковый температурный градиент, в этом интервале глубины температура оценена в 270–330 °С [4, 6, 13]. При этой температуре, как и в нижней части Толщи IC, глинистые минералы представлены новообразованным смешанослойным хлорит-корренситом, но уже с преобладанием хлоритовых слоев над корренситовыми ($W_x:W_k = 0.89:0.11$), (табл. 2).

Сходства и различия глинистых минералов в осадках из скважин 1036А и 858В

Глинистые минералы и температура их образования в осадках из скважин 1036А и 858В, пробуренных на разном расстоянии от гидротермальных источников, показаны в таблице 3.

Металлоносные осадки

Диоктаэдрический смешанослойный смектит-иллит является характерным глинистым минералом, для металлоносных осадков как из скважины 858В (образец 2949) [4], которая находится в 20 м от гидротермального источника с температурой 276 °С, так из скважины 1036А (образец 4042, табл. 2), пробуренной в 9 м от гидротермального источника с температурой 268 °С. Моделирование дифрактограммы образца 2949 совместно с разложением экспериментального профиля 060 рефлексов показало, что смектит-иллит является диоктаэдрическим, богатым Fe смешанослойным слюда-смектитом, который возможно соответствует глауконит-нонтрониту или селадонит-нонтрониту [4] (табл. 3). Близкие по структуре индикаторные минералы генетического ряда от нонтронита до селадонита через их смешанослойные фазы селадонит-нонтронитового состава были установлены в современных рудоносных осадках впадины Атлантик II в Красном море [1, 2].

Различие заключается в том, что в осадках из скважины 1036А в металлоносных осадках нет примеси терригенных глинистых минералов гемипелагических осадков, а в осадках из скважины 858В, более удаленной, чем скважина 1036А, от гидротермального источника, они присутствуют (табл. 3).

Терригенные глинистые минералы

Терригенные глинистые минералы в осадках из скважин 1036А и 858В состоят из диоктаэдрических смектита, смектит-иллита, иллита и триоктаэдрического хлорита (табл. 3). Они установлены в скважине 1036А, в интервале глубин 6.10–10.04 м, и в скважине 858В, в интервале от 1.97 м до 7.20 м. Терригенные глинистые минералы сохранились без изменения при температуре примерно 17 °С, которая обусловлена охлаждением осадков проникающей в

Таблица 3. Глинистые минералы и температура их образования (скважины 1036А и 858В, пробуренные в 9 м и 20 м от гидротермальных источников с температурой 268 °С и 276 °С).

1036А		858В [Сахаров, Курносов, 2022]	
Толща	Глинистые минералы	Толща	Глинистые минералы
IV	Смектит-иллит (диоكت)	III	Fe слюда-смектит (диокт), смектит и хлорит (триокт), иллит (диокт).
6.10 м	4	I	Терригенные (диокт) смектит, смектит-иллит (0.75:0.25), иллит и (триокт) хлорит
IA	Терригенные (диокт) смектит, смектит-иллит (0.5:0.5), иллит и (триокт) хлорит.	7.20 м	Новообразованные (триокт) хлорит-смектит (0.85:0.15 и 0.65:0.35), (триокт) смектит, и хлорит-корренсит (0.75:0.25).
9.20 м	1	10.41 м	Сохранились терригенные иллит и хлорит. Нет терригенных смектита и смектит-иллита.
IB		IV	Сульфидный слой.
10.04 м	2	12.70 м	Глинистые минералы, как над Толщей IV.
IC	Новообразованный (триокт) хлорит-смектит (0.9:0.1 и 0.95:0.05). Сохранились терригенные иллит (диокт) и остатки смектита (диокт) и хлорита (триокт). Нет терригенного смектит-иллита.	I	Новообразованные (триокт) хлорит-корренсит (0.8:0.2), корренсит-хлорит (0.8:0.2), хлорит-смектит (0.5:0.5). Нет терригенных глинистых минералов.
20 м	3а	25.31 м	
IC	Новообразованный (триокт) хлорит-корренсит (от 0.6:0.4 до 0.5:0.5). Нет терригенных глинистых минералов.	IIIВ	
30.70 м	36	31.83 м	Новообразованные (триокт) хлорит, хлорит-смектит (0.5:0.5), корренсит-хлорит (0.8:0.2), тальк-смектит (0.6:0.4).
IIС	Новообразованный (триокт) хлорит-корренсит (от 0.89:0.11). В одном образце присутствует (диокт) иллит.	IIIД	Хлорит
~38 м		38 м	
38.50 м		38.60 м	

Примечание. (диокт), (триокт) – обозначение диоктаэдрической и триоктаэдрической фаз; (0.5:0.5) и т.п. – вероятности встречаемости смектитовых, иллитовых, хлоритовых и корренситовых слоев в соответствующих смешанослойных структурах.

них придонной морской воды. Ожидалось, что нижняя граница распространения терригенных глинистых минералов в осадках из скважины 858В будет встречена ниже, чем в скважине 1036А, а не наоборот, так как при удалении от центральных каналов разгрузки гидротермальных растворов к флангам конвективной гидротермальной системы холодная морская вода просачивается в осадочный покров на большую глубину.

Терригенные глинистые минералы в осадках Толщи I из скважины 858В первоначально были распространены до глубины примерно 16–17 м. Но при поступлении в Толщу I горячего гидротермального раствора из центрального канала разгрузки гидротермальной системы [7] терригенные глинистые минералы (диоктаэдрические смектит и неупорядоченный смектит-иллит) были преобразованы в триоктаэдрические хлорит-смектит, смектит и хлорит-корренсит (табл. 3). Терригенные хлорит и иллит сохранились без изменения. В результате в Толще I (скважина 858В) терригенные глинистые минералы встречены только в интервале глубин 1.97–7.20 м.

Вертикальная гидротермальная зональность формирования глинистых минералов

В осадках из скважины 1036А вертикальная гидротермальная зональность формирования глинистых минералов прослежена в диапазоне температур от ~112–200 °С до 270–330 °С. Она проявлена в преобразовании исходных терригенных глинистых минералов по схеме: диоктаэдрический смектит-иллит → триоктаэдрический хлорит-смектит → триоктаэдрический хлорит-корренсит → предположительно хлорит (табл. 3). Структурные переходы одних глинистых минералов в другие предполагают их формирование на каждом этапе по механизму растворения и синтеза.

В осадках из скважины 858В возможно было проследить вертикальную гидротермальную зональность формирования глинистых минералов только в интервале температур от 200 °С до 270–330 °С. Она проявлена в преобразовании исходных терригенных глинистых минералов по схеме: диоктаэдрический смектит-иллит → триоктаэдрический хлорит-корренсит + триоктаэдрический корренсит-хлорит + триоктаэдрический хлорит-смектит → триоктаэдрический хлорит + триоктаэдрический хлорит-смектит + триоктаэдрический корренсит-хлорит + триоктаэдрический тальк-смектит → хлорит [4] (табл. 3).

Сравнение этих схем показало, что различия заключаются в том, что новообразованные глинистые минералы в наиболее удаленной от гидротермального источника скважине 858В в каждом температурном

диапазоне представлены несколькими фазами, в то время как в скважине 1036А, расположенной ближе к гидротермальному источнику, в каждой температурной зоне ~112–200 °С, 200–270 °С и 270–330 °С сформировался мономинеральный глинистый минерал, несмотря на то, что их образование произошло, как и в скважине 858В, в условиях одинакового температурного градиента. Это различие можно объяснить, по-видимому, только тем, что химический состав раствора, взаимодействующего с осадками, находящимися ближе к гидротермальному источнику, может несколько отличаться от раствора в осадках, более удаленных от него.

Вывод о различии химического состава раствора в осадках, находящихся на разном расстоянии от гидротермального источника, подтверждается тем, что в скважине 858В, в интервале температур от 270 °С до 330 °С, сформировался наряду с другими смешанослойными минералами тальк-смектит, которого нет в этом температурном диапазоне в скважине 1036А. Это можно объяснить тем, что при движении проникшей в гидротермальную систему морской воды от флангов к ее центру, к каналам подъема и разгрузки на дне горячего рудообразующего раствора, происходит изменение ее химического состава. На этом пути, по экспериментальным данным [5], морская вода обедняется магнием. Этот магний был частично израсходован на образование в осадках из скважины 858В тальк-смектита, в то время как в скважине 1036А в том же температурном диапазоне магния оказалось уже недостаточно в растворе для формирования тальк-смектита.

Тонкодисперсный иллит в образце 4052-1

Во фракции < 0.001 мм гидротермально измененных осадков (образец 4052-1) кроме триоктаэдрического смешанослойного хлорит-корренсита (71.1 %) установлен диоктаэдрический иллит (28.9 %), в то время как во всех образцах Групп 3а и 3б его нет (табл. 2). По результатам количественного рентгенофазового анализа в валовом образце 4052-1 иллит присутствует (16.4 %). Это содержание иллита в валовом образце 4052-1 и его содержание в валовых образцах 4044 и 4045 терригенных осадков (12.2 % и 12.5 %) одного порядка, что может указывать на терригенную природу иллита в валовом образце 4052-1.

Тонкодисперсный иллит в терригенных осадках (образцы 4044 и 4045) составляет 11.6 % и 12.1 %. Он сохранился в образцах Группы 2 (4046 и 4047-1) с похожим содержанием 15.1 % и 18.5 % (табл. 2). В образцах Группы 3а (4048–4051) и в образце 4053 из Группы 3б тонкодисперсного иллита нет, по-видимому, он растворился. В то же время, в образце 4052-1

из Группы 3б тонкодисперсный иллит присутствует в большем количестве (~29 %), чем во фракции < 0.001 мм терригенных осадков (11.6 % и 12.1 %). Можно сделать предположение, что первоначально в этой части разреза осадок был высокослюдястым, в котором терригенный тонкодисперсный иллит также присутствовал, в то же время, присутствовал и слюдястый минерал, устойчивый к растворению. В результате иллит растворился так же, как в образцах Групп 3а и 3б, а устойчивый к растворению слюдястый минерал остался без изменения и составляет ~29 %.

Альтернативное представление о природе тонкодисперсного иллита связано с предположением, что он новообразованный. В этом случае в осадках, в которых изучен образец 4052-1, был горизонтальный поток растворов. Их существование в осадочном покрове было показано в статье [19] на примере скважины 858В, расположенной недалеко от скважины 1036А. Для образования иллита необходим калий. Поставщиком его мог быть, прежде всего, терригенный тонкодисперсный смектит-иллит, который, по-видимому, был растворен, а также КПШ, присутствующий в терригенных валовых образцах, и которого нет в валовом образце 4052-1 в осадках. Вероятно, он также был растворен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода моделирования дифракционных картин позволило правильно идентифицировать глинистые минералы, определить их концентрации в верхнеплейстоценовых осадках из скважины 1036А, пробуренной до глубины 38.50 м в 9 м от «черного курильщика» с температурой 268 °С на гидротермальном поле «Мертвая собака». На основе полученных результатов выявлена вертикальная гидротермальная зональность формирования глинистых минералов в средне-высокотемпературных условиях в осадках, находящихся в центре гидротермальной системы рядом с центральным вертикальным каналом, по которому поднимается горячий рудообразующий флюид и разгружается на дне в виде «черного курильщика». Установлено, что исходные терригенные глинистые минералы преобразованы по схеме: диоктаэдрический смектит-иллит → триоктаэдрический хлорит-смектит → триоктаэдрический хлорит-корренсит → возможно хлорит в диапазоне температур от ~112–200 °С до 270–330 °С.

Установлены сходства и различия новообразованных глинистых минералов в осадках из скважин 1036А и 858В, пробуренных на разном расстоянии от гидротермальных источников. При общем сходстве направленности образования глинистых минералов в условиях вертикальной температурной зональности

основное различие заключается в том, что в осадках, находящихся ближе к центральному вертикальному каналу подъема и разгрузки гидротермального флюида в виде гидротермального источника (скважина 1036А), сформировался в каждом температурном диапазоне мономинеральный глинистый минерал, в то время, как в осадках, более удаленных от гидротермального источника (скважина 858В), образовалось по несколько фаз (табл. 3).

Результаты проведенного исследования являются на сегодняшний день наиболее полными в знании формирования глинистых минералов в плейстоценовых осадках, находящихся внутри конвективных гидротермальных систем, рядом с гидротермальными источниками, и могут служить моделью образования глинистых минералов в аналогичных объектах в спрединговых океанических хребтах, перекрытых осадочным чехлом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Т.Д. Зеленовой за выделение из осадков фракции < 0.001 мм и подготовку препаратов для рентгеновской дифрактометрии и Е.В. Покровской за проведение рентгеновских съемок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00064, <https://rscf.ru/project/23-27-00064/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутузова Г.Ю., Дриц В.А., Лисицына Н.А., Ципурский С.И., Дмитрик А.Л. Динамика формирования глинистых минералов в рудоносных осадках впадины Атлантик-II (Красное море) // Литология и полез. ископаемые. 1979. № 1. С. 30–42.
2. Бутузова Г.Ю., Дриц В.А., Лисицына Н.А., Ципурский С.И. Новые данные об аутигенных слоистых силикатах в металлоносных осадках впадины Атлантик-II (Красное море) // Литология и полез. ископаемые. 1983. № 5. С. 82–88.
3. Дриц В.А., Сахаров Б.А. Рентгеноструктурный анализ смешанослойных минералов. М.: Наука, 1976. 256 с.
4. Сахаров Б.А., Курносов В.Б. Особенности образования глинистых минералов в осадках из центра гидротермальной системы, скважина 858В, хребет Хуан де Фука // Литология и полез. ископаемые. 2022. № 2. С. 181–204.
5. Bischoff J.L., Seyfried W.E. Hydrothermal chemistry of seawater from 25° to 350 °C // American J. Sci. 1978. V. 278. P. 838–860.
6. Buatier M.D., Karpoff A.-M., Boni M., Früh-Green G.L., McKenzie J.A. Mineralogical and petrographic records of sediment-fluid interaction in the sedimentary sequence at Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, Leg 139 // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 1994. V. 139. P. 133–154.
7. Davis E.E., Mottl M.J., Fisher A.T. et al. Init. Repts. 1992. V. 139. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1026 p.

8. 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.
9. Doebelin N., Kleeberg R., Profex. A graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN // *J. Appl. Crystallogr.* 2015. V. 48. P. 1573–1580.
10. Drits V.A., Tchoubar C. X-Ray diffraction by disordered lamellar structures. Heldenberg: Springer-Verlag, 1990. 371 p.
11. Drits V.A., Lindgreen H., Salyn A.L. Determination by X-ray diffraction of content and distribution of fixed ammonium in illite-smectite. Application to North Sea illite-smectite // *Am. Mineral.* 1997. V. 82. P. 79–87.
12. Fouquet Y., Zierenberg R.A., Miller D.J. et al. // *Proc. ODP. Init Repts.*, 169: College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1998.
13. Frü-Green G.L., McKenzie J.A., Boni M., Karpoff A-M., Buatier M.D. Stable isotope and geochemical record of convective hydrothermal circulation in the sedimentary sequence of Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, Leg 139 // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results.* 1994. V. 139. P. 291–306.
14. Lackschewitz K.S., Singer A., Botz R., Garbe-Schonberg D., Stoffers P., Horz K. Formation and transformation of clay minerals in the hydrothermal deposits of Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, ODP Leg 169 // *Economic Geology.* 2000. V. 95. P. 361–390.
15. Moore D.M., Reynolds R.C.J. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, 2nd ed., Oxford University Press: Oxford, UK, 1999.
16. Post J.E., Bish D.L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data // *Rev. Mineral.* 1989. V. 20. P. 277–308. [CrossRef].
17. Sakharov B.A., Lindgreen H., Salyn A.L., Drits V.A. Determination of illite-smectite structures using multispecimen X-ray diffraction profile fitting // *Clays and Clay Miner.* 1999. V. 47. P. 555–566.
18. Sakharov B.A., Lanson B. X-ray identification of mixed-layer structures // *Modeling of diffraction effects. Chapter 2.3. Handbook of Clay Science. Part B. Techniques and Applications / Eds F. Bergaya, G. Lagaly.* Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, N.Y., Oxford: Elsevier. 2013. P. 51–135.
19. Zierenberg R.A., Koski R.A., Morton J.I. 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.

Рекомендована к печати И.Б. Цой

после доработки 17.10.2024 г.

принята к печати 29.12.2024 г.

CLAY MINERALS IN UPPER PLEISTOCENE SEDIMENTS FROM THE CENTER OF THE HYDROTHERMAL SYSTEM, HOLE ODP 1036A, MIDDLE VALLEY, JUAN DE FUCA RIDGE, PACIFIC OCEAN

V.B. Kurnosov^a, B.A. Sakharov^a, I.A. Morozov^b, D.M. Korshunov^a

^a*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: vic-kurnosov@rambler.ru, e-mail: sakharovba@gmail.com*

^b*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Modeling of X-ray diffraction patterns was used for studying clay minerals from the Upper Pleistocene sediments of Hole ODP 1036A which was drilled to a depth of 38.50 m 9 m from a hydrothermal vent with a temperature of 268 °C in the Dead Dog hydrothermal field (northern part of the Middle Valley of the Juan de Fuca Ridge). In the sediment section of Hole ODP 1036A, terrigenous clay minerals were preserved in the depth range from 6.10 m to 10.04 m under low temperature conditions of ~17 °C. They consist of dioctahedral smectite, mixed-layer smectite-illite, illite, and trioctahedral chlorite. In the depth range from 10.04 m to ~20 m at temperatures from ~112 °C to 200 °C, trioctahedral mixed-layer chlorite-smectite formed instead of terrigenous clay minerals. In the lower half of the sediment section from Hole ODP 1036A, in the depth range of 20–38.50 m at temperatures from 200 °C to 330 °C, trioctahedral chlorite-corrensitite was formed, and chlorite was formed at the very bottom of the section.

Key words: clay minerals, hydrothermal field, deep-sea drilling, Juan de Fuca Ridge, Pacific Ocean.