УДК 551

# МИНЕРАЛОГИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДОЛИНЫ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА ВИМА (ЦЕНТРАЛЬНАЯ АТЛАНТИКА)

©2024 г. И. О. Мурдмаа, О. М. Дара, М. А. Лыкова, Д. Г. Борисов, Е. В. Иванова\*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: e\_v\_ivanova@ocean.ru Поступила в редакцию 02.11.2022 г. После доработки 28.11.2022 г. Принята к публикации 16.02.2023 г.

Методом полуколичественного рентгенографического фазового анализа валовых порошковых препаратов изучен состав осадкообразующих минералов двух колонок из восточной (AHC45-37) и западной (AHC45-48) частей долины трансформного разлома Вима. Для сравнения сделан анализ минерального состава проб донных осадков конуса выноса Амазонки. Оказалось, что средний состав терригенного материала колонок из разлома Вима (по преобладающему кварцу, второстепенным: слюде, плагиоклазу, калиевому полевому шпату, смектиту, хлориту, каолиниту и иллиту) близок между собой и соответствует составу осадков конуса Амазонки. Соотношение четырех глинистых минералов указывает на то, что терригенный материал попадал в воды Амазонки и Ориноко за счет эрозии пород Анд и тропического гумидного выветривания в нижнем течении рек, а затем транспортировался в океан. Этот материал перенесен в долину разлома Вима в результате совместного действия гравитационных потоков с континентального склона Южной Америки и течения Антарктической донной воды. Попутно получены данные о биогенных кальците (раковины планктонных фораминифер, наннофоссилии) и опале А (радиолярии, спикулы губок). В районе исследования обнаружен ряд аутигенных минералов. Впервые в донных осадках из долины разлома Вима диагностирован сидерит, а в конусе выноса реки Амазонки — грейгит.

**Ключевые слова:** глинистые минералы, терригенные биогенные и аутигенные минералы, Антарктическая донная вода, гравитационные потоки, микрофоссилии, Амазонка, Ориноко, Анды, тропическое выветривание

DOI: 10.31857/S0030157424010048, EDN: EPGLNA

## введение

Широко распространено мнение, что терригенная взвесь и твердый сток Амазонки и, в меньшей степени, Ориноко оказывают существенное влияние на состав и скорости накопления глубоководных осадков северной тропической зоны Атлантики, являясь одним из важнейших источников осадочного материала [6, 28, 38]. Это подтверждается результатами многочисленных исследований минерального состава донных осадков, большая часть которых посвящена анализу состава глинистых минералов. Детальное изучение состава глинистых минералов в пределах водосборного бассейна Амазонки показало, что относительное содержание минералов группы смектита увеличивается вниз по течению до 50% [31]. Установлено высокое содержание каолинита в притоках Амазонки, но оно значительно снижается в основном русле [31]. Относительно высокое суммарное содержание иллита и хлорита в основных притоках реки маркирует материал из Анд, откуда поступает около 90% всего взвешенного осадочного вещества Амазонки [21, 22, 28, 30, 37, 46]. Изучение тяжелых минералов в устье Амазонки и на прилегающей части шельфа позволило выделить характерную для данной реки ассоциацию минералов: пироксены (авгит). андалузит, гиперстен, роговую обманку, эпидот, циркон и гранат [10, 47]. Состав глинистых минералов в отложениях конуса выноса Амазонки детально изучен по материалам 16 скважин Проекта глубоководного бурения ODP [14, 24]. Содержание каолинита составляет 14-25%, смектитов -30-48%, иллита — 19-36%, хлорита — 8-13% [14].

Характерной особенностью осадочного материала из Ориноко является наличие пирофиллита

[13, 16]. В остальном минералогия взвеси из Ориноко и Амазонки сходна [16].

Материал из Амазонки распространяется далеко за пределы конуса выноса, в том числе достигает зоны разлома Вима [33] и даже (вместе с осадочным материалом из Ориноко) Карибского бассейна [13]. Предполагается, что долина разлома Вима заполняется быстро накапливающейся толщей преимущественно терригенных отложений — в основном тонкозернистыми выносами Амазонки [48, 51], но прямых минералогических доказательств этого почти нет. Опубликованы только результаты анализа минерального состава для отложений, вскрытых скв. 26 DSDP на глубине более 96 м ниже поверхности дна [9, 43]. Они показывают, что содержание кварца варьирует в пределах 34.9-37.1%, слюды — 34.6-39.4%, плагиоклаза — 4.8-6.3%, каолинита — 9.6-13.3%, хлорита — 5.5-6.4% [43]. Наличие гематитного и розового кварца, берилла и корунда в осадках скв. 26 указывает на Амазонский источник [9].

Механизмы транспортировки взвешенного (преимущественно глинистого) материала от источника на континенте в глубоководные районы Мирового океана описаны в работах [11, 20, 29, 41, 53]. Отдельное внимание в этих статьях уделяется роли придонных течений в переносе взвешенных глинистых частиц.

В данной статье рассматривается проблема поступления взвешенного осадочного материала твердого стока Амазонки в долину трансформного разлома Вима, которая считается главным путем переноса тяжелых холодных Антарктических донных вод (ААДВ) из западной Атлантики в восточную [17, 32, 36, 40] (рис. 1).

Цель данной статьи — на примере минерального состава терригенной составляющей четвертичных осадков, вскрытых двумя колонками (АНС45-48 и АНС45-37) в западной и восточной частях долины разлома Вима соответственно, показать, что верхняя часть ее осадочного заполнения представлена выносами Амазонки, поступающими сюда в результате взаимодействия гравитационных потоков (с континентального склона) и течения ААДВ. Наши данные позволяют проследить, насколько изменяется минеральный состав осадков на пути из западной части долины Вима в восточную в течение последней, скорее всего, позднечетвертичной стадии геологической истории. Попутно изучались найденные в тех же колонках биогенные и аутигенные минералы.

## РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

**Рельеф** дна. Долина разлома Вима простирается в субширотном направлении более чем на 500 км (см. рис. 1а). Она имеет хорошо выра-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

женную U-образную форму и ограничена крутыми стенками, падающими под углом 15-30° [32, 48, 50]. Ширина долины варьирует от 10 до 20 км [32], глубина осевой части, выровненной за счет накопления осалков, превышает 5 км [34, 48, 50]. С юга долина ограничивается длинным узким поперечным хребтом (например, [12]), который простирается в субширотном направлении на 320 км и возвышается более чем на 3 км над дном долины, представляя собой поднятый блок океанической коры [12, 42]. Одной из особенностей долины является медианный хребет [35, 50]. В западной части долины (~46° з.д.) находится эрозионный канал (см. рис. 1в), который прослеживается на восток до 45°30' з.д. Мощность осадков в пределах долины превышает 1.5 км [17, 34].

Океанографическая характеристика. Волная толща в пределах трансформной долины четко стратифицирована. Поверхностные и подповерхностные воды Северо-Бразильского течения и Северного экваториального противотечения, транспортирующие на север (северо-запад) выносимый Амазонкой взвешенный осадочный материал, прослеживаются до глубин 300-400 м (см. рис. 1а). Интервалы глубин от 500 до ~1100 м и 1200-4100 м занимают Антарктическая промежуточная вода (ААПВ) и Северо-Атлантическая глубинная вода (САГВ) соответственно [3, 40]. Антарктическая донная вода (ААДВ) на глубинах более 4100 м отличается минимумом температуры и солености [3, 4, 17]. Большая часть этой воды движется на восток на глубине более 4650 м (ниже седловины в восточной части разлома) (см. рис. 1а). Расход потока ААДВ через разлом оценивается в 0.5-2.1 Св [25, 36, 44, 51]. Измеренные скорости придонных течений в разломе достигают 20-33 см/с [2, 23, 36, 40].

Донные осадки. Район исследования относится к экваториальной гумидной зоне литогенеза, которая характеризуется поступлением в океан больших масс приносимого реками терригенного материала, высокой биопродуктивностью и низкими темпами абразии берегов. Во взвешенном, приносимом из кор выветривания материале преобладает глинистая фракция [6]. Минеральный состав темно-серых силтово-глинистых илов и мелкозернистых песков, залегающих пол типичной для Вимы «известковой шапкой» фораминиферово-кокколитовых илов, указывает на континентальный склон Бразилии и Амазонку в качестве источников этих терригенных отложений [50]. Слоистые фораминиферовые и ультрабазитовые пески, изученные Хизеном с соавторами в колонках из восточной части долины, интерпретируются авторами и последующими исследователями как турбидиты, вероятно, из локального источника, т.е. с фланга Срединно-Атлантического хребта (САХ) [32, 49, 50].



**Рис. 1.** (а) Батиметрическая схема района исследования [27] с указанием расположения станций пробоотбора, направлений основных поверхностных течений и течения ААДВ, предполагаемых направлений гравитационных потоков и переноса взвеси из Амазонки поверхностными течениями. СБТ – Северо-Бразильское течение; СЭПТ – Северное экваториальное противотечение; ААДВ – Антарктическая донная вода. (б) Расположение района исследований с указанием положения основных русел рек Амазонка и Ориноко, предполагаемых направлений течения ААДВ, гравитационных потоков и направления поремения суказанием положения основных русел рек Амазонка и Ориноко, предполагаемых направлений течения ААДВ, гравитационных потоков и направления переноса взвеси из Амазонки поверхностными течениями. (в) Батиметрическая схема западной части трансформной долины Вима [45] с указанием положения станции отбора донных осадков, предполагаемых направлений потоков ААДВ, направлений гравитационных потоков. *1* – направления поверхностных течений; *2* – направление потока ААДВ; *3* – станция отбора донных осадков; *4* – скважина глубоководного бурения; *5* – направления правления гравитационных потоков осадочного материала; *6* – направление переноса взвеси из Амазонки под действием поверхность бурения.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Колонки АНС45-37 и АНС45-48 получены гравитационной трубкой в 45-ом рейсе НИС «Академик Николай Страхов» в восточной (№ 37) и западной (№ 48) частях долины разлома Вима, с глубин более 5 км (табл. 1, [4]). Колонка

АНС45-37 отобрана на относительно ровном участке дна, а колонка АНС45-48 — в субширотном эрозионном канале (см. рис. 1). Колонки АИ-4126 и АИ-4127 получены в нижней части конуса Амазонки, а дночерпательная проба АИ-4125 — на абиссальной равнине у подножия конуса, за пределами 200-мильной зоны Бразилии, в 60-ом

рейсе НИС «Академик Иоффе» [5]. Для колонок АИ-4126 и АИ-4127 были исследованы четыре пробы из кернорвателя. Характеристика вскрытых колонками донных осадков составлена на основании результатов макроскопического описания на борту судна и последующего изучения осадков в смер-слайдах под поляризационным микроскопом. Для описания гранулометрического состава использована международная гранулометрическая классификация [26], по которой силт (silt) – это размерная фракция частиц 2–63 мкм, а глина (clay) – <2 мкм. Соответственно силтово-глинистый осадок содержит 50–75% глины и 25–50% силта.

Просмотр и фотодокументация образцов осадков проводились с использованием бинокуляра STEMI 508 Zeiss. Планктонные фораминиферы просмотрены под бинокуляром в песчаной фракции осадка с интервалом 10 см.

Минеральный состав валовых проб, выделенной глинистой фракции и отобранных под бинокуляром отдельных зерен выполнен на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXC), Cu-Ka, с Ni 0.02-фильтром, напряжением 40 кВ, током 40 мА, с линейным детектором LYNXEYE. Сканирование проведено в дискретном режиме с шагом 0.02°, экспозицией 4 секунд/шаг в интервале 2.5-70°20, с вращением. Для первичной обработки, расчета, расшифровки спектров использована программа diffract.EVA.-V5.0.0.22. Идентификация фаз и полуколичественный анализ проведены с использованием дифрактометрических характеристик минералов из базы данных PDF-2 ICDD (International Centre for Difraction Data). Для диагностики минералов также были использованы стандартные методики, изложенные в специальной литературе [7, 8, 39].

Во избежание потерь минерального вещества при обработке осадков кислотами с последующей многократной промывкой, так же как и при отборе глинистой фракции, нами был выбран следующий подход. На первом этапе методом рентгенографического фазового анализа были изучены разориентированные валовые образцы с целью определения минерального состава и полуколичественного соотношения минералов в пробе. Далее, из просмотренного ранее под бинокуляром валового материала были извлечены и сняты на дифрактометре отдельные зерна, линзы и стяжения для уточнения минерального состава. Диагностика глин выполнялась на разориентированных валовых образцах и ориентированных препаратах глинистой фракции. Полуколичественные данные по валовому составу были пересчитаны на бескальцитовое вещество (с допущением, что известковая составляющая имеет биогенное происхождение), а минералы глин приведены к условным 100%.

Идентификация глинистых минералов проводилась в соответствии с широко распространенными в практике изучения глин методиками [7, 8, 39]. Были приготовлены ориентированные воздушно-сухие препараты из суспензии глинистой фракции, отделенной от образца в дистиллированной воде.

После съемки воздушно-сухих ориентированных препаратов проведены повторные съемки образцов, насыщенных этиленгликолем (для диагностики минералов группы смектита, а также смешанно-слоистых образований с разбухающими слоями). При необходимости образцы были прогреты при 550°С (для диагностики каолинита и хлорита). Анализ глинистых минералов по данной методике выполнен для шести литологически контрастных образцов из долины Вима, а также образцов из конуса Амазонки.

После съемки воздушно-сухих ориентированных препаратов проведены повторные съемки образцов, насыщенных этиленгликолем (для диагностики минералов группы смектита, а также смешанно-слоистых образований с разбухающими слоями). При необходимости образцы были прогреты при 550°С (для диагностики каолинита и хлорита). Анализ глинистых минералов по данной методике выполнен для шести литологически контрастных образцов из долины Вима, а также образцов из конуса Амазонки.

Номер станции	Широта, ю.ш.	Долгота, з.д.	Глубина, м	Длина, см
АНС45-37 тбд	10°44.8'	41°35.0'	5217	379
АНС45-48 тбд	11°00.5'	45°59.8'	5100	423
АИ-4125 дч	07°04.83'	46°57.25'	4227	10
АИ-4126 тбд	04°35.35'	47°21.368'	2772	CC
АИ-4127 тбд	04°03.682'	47°26.505'	2215	CC

Таблица 1. Координаты и глубины станций отбора колонок

Примечания для всех таблиц: тбд — трубка большого диаметра, дч — дночерпатель, СС — кернорватель трубки.

На разрезанных вдоль секциях колонок проводились измерения объемной магнитной восприимчивости — к (меры намагничивания вещества под действием внешнего магнитного поля) с помощью системы Bartington MS3 с поверхностным сканирующим датчиком Bartington MS2E в составе автоматизированной системы комплексного исследования кернов Geotek MSCL-XYZ соге workstation. Шаг измерений составил 0.5 см, время единичного измерения — 1 с, фоновое измерение проводилось после каждого измерения образца. Исследование проводилось через пленку Chemplex Prolene 416 толщиной 4 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Литологическая характеристика. В колонке АНС45-37 выделены три интервала. Верхний слой (0-36 см) представлен окисленным желтовато-коричневым слабоизвестковистым глинисто-тонкосилтовым умеренно биотурбированным илом. Ниже по разрезу (36-45 см) выделяется переходный слой, сложенный темно-желтовато-коричневым плотным глинисто-тонкосилтовым илом с железисто-марганцовистыми корками и прослоями. В интервале 45-379 см колонка вскрыла восстановленный оливково-серый глинисто-тонкосилтовый ил с многочисленными примазками (реже пятнами) гидротроилита. Вниз по разрезу содержание терригенных зерен незначительно увеличивается (слюда, кварц), а содержание остатков кремневых и карбонатных организмов остается примерно на постоянном уровне.

Колонка АНС45-48 представлена в верхней части известковистыми (до известковых) илами и фораминиферовым песком. Три интервала обогащены терригенными зернами песка и силта: 36-48 см, 72-81 см, 338-341 см. Окислительно-восстановительная граница на 94 см очень резкая. Ниже этой границы в восстановленных осадках встречается большое количество наземной органики и выделений гидротроилита. В интервалах 341-354 и 354-361 см выявлено значительное обогащение биогенным карбонатным материалом: в первом интервале — птероподовый ил, во втором — полосчатый фораминиферовый ил (полосы с более крупными и более мелкими раковинами).

Осадки в дночерпательной пробе со станции АИ-4125 представлены практически бескарбонатным глинистым и слабоизвестковистым глинистым илом со следами биотурбации. Изученные осадки из нижних частей колонок АИ-4126 и АИ-4127 представлены темно-зеленовато-серым плотным глинистым илом с большим количеством пятен гидротроилита. В центре пятен плотные темные стяжения миллиметрового и субмиллиметрового размера.

Результаты валового анализа минерального состава донных отложений приведены в табл. 2.

Терригенные минералы. Данные, полученные в результате пересчета результатов валового анализа на бескальцитовое вещество (табл. 3), показали, что в терригенном материале резко преобладают кварц (в колонке АНС45-37: 19-38%, в среднем 25%, в колонке АНС45-48: 15-68%, в среднем 27%) и сумма четырех глинистых минералов: смектит, иллит, хлорит и каолинит. В сумме они составляют 46-63%, среднее содержание 57% в колонке АНС 45-37, сумма глинистых 14-70%, среднее 53% в колонке АНС 45-48 (табл. 3. рисунки 2-5). Несмотря на сушественно более широкий диапазон величин главных компонентов в колонке АНС45-48, их средние значения достаточно близки для признания их в целом однотипными. Постоянно присутствуют в обеих колонках в подчиненном количестве плагиоклазы и калиевые полевые шпаты (КПШ).

Суммарные данные по диагностированным в осадках слюдам мусковитового и биотит-флогопитового типов близки — 0–13% (среднее 8%) в АНС45-37 и 0–15% (среднее 6%) в АНС45-48. Спорадически в обеих колонках встречен амфибол. В двух пробах колонки АНС45-37 обнаружен пироксен. В колонке АНС45-48 присутствуют сидерит, апатит, сера ( $S_8$ ) и гипс, а в колонке АНС45-37 – гипс, гетит, лепидокрокит, акагенит. В ряде образцов из колонки АНС45-48 на пороге обнаружения диагностирован тальк. На рис. 6 представлены дифрактограммы образцов донных осадков девяти горизонтов колонки АНС45-48, отражающие изменчивость минерального комплекса изучаемой толщи по глубине залегания.

В изученных 5 образцах осадков района конуса выноса Амазонки встречены те же основные компоненты — кварц и сумма глинистых минералов. Их средние процентные содержания (см. табл. 2) равны 29–33% для кварца и 49–63% для суммы четырех глинистых минералов соответственно.

В обеих колонках и в пробах с трех станций из района конуса выноса Амазонки диагностированы щелочно-щелочноземельный диоктаэдрический смектит (монтмориллонит), магнезиально-железистый хлорит, каолинит и иллит с минимальным количеством разбухающих слоев. В отдельных зернах, представляющих собой агрегаты и сростки (0.15–0.2 мм), из переходного слоя колонки АНС45-37 диагностированы смешанно-слоистое образование иллит-хлорит, а также серпентин с биотитом и хлоритом.

Соотношение четырех главных глинистых минералов, сумма которых принята за 100% (табл. 4), характеризуется преобладанием хлорита и каолинита в примерно равных количествах. На третьем месте смектит, а иллита значительно меньше в большинстве проб. Средние величины близки в обеих колонках и сходны с величинами, определенными в пробах из района конуса Амазонки (см. табл. 4).

#### МИНЕРАЛОГИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ



Рис. 2. Содержание всех минералов в колонке АНС45-37, сопоставленное со средним размером зерен и магнитной восприимчивостью.



Рис. 3. Содержание всех минералов в колонке АНС45-48, сопоставленное со средним размером зерен и магнитной восприимчивостью.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

## МУРДМАА и др.



**Рис. 4.** Относительное содержание глинистых минералов при допущении их суммы 100% в колонке AHC45-37, сопоставленное со средним размером зерен, магнитной восприимчивостью и содержанием биогенного кальцита.



**Рис. 5.** Относительное содержание глинистых минералов при допущении их суммы 100% в колонке AHC45-48, сопоставленное со средним размером зерен, магнитной восприимчивостью и содержанием биогенного кальцита.

Ļ	
貫	
- É	
ď	
2	
XI	
Тa	
H	
Ĕ	
d	
E	
N XI	
B	
្តត្ត	
Be	
I B	
Ŷ	
HO	
<b>3</b> 3	
Ą	
₹.	
ιb	
Sc	
HC	
ĭΕΙ	
ав	
S	
ЭH.	
X	
И	
Ма	
E	
Ë	
N.	<u></u>
g	8
a3.	PIe
0	
	B
HbI I	COB
ины	BecoB
алины ј	и (весов
і долины р	оии (весов
ой долины	стрии (весов
иной долины р	метрии (весов
рмной долины р	тометрии (весов
формной долины р	актометрии (весов
ісформной долины р	орактометрии (весов
ансформной долины	ифрактометрии (весов
трансформной долины р	г дифрактометрии (весов
ій трансформной долины ן	ой дифрактометрии (весов
ний трансформной долины ן	ской дифрактометрии (весов
кений трансформной долины ј	овской дифрактометрии (весов
ожений трансформной долины р	новской дифрактометрии (весов
иложений трансформной долины р	ггеновской дифрактометрии (весов
х отложений трансформной долины р	нтгеновской дифрактометрии (весов
ых отложений трансформной долины р	рентгеновской дифрактометрии (весов
нных отложений трансформной долины р	м рентгеновской дифрактометрии (весов
онных отложений трансформной долины р	дом рентгеновской дифрактометрии (весов
в донных отложений трансформной долины ј	тодом рентгеновской дифрактометрии (весов
тав донных отложений трансформной долины ј	методом рентгеновской дифрактометрии (весов
остав донных отложений трансформной долины į	б методом рентгеновской дифрактометрии (весов
і состав донных отложений трансформной долины į	роб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
ый состав донных отложений трансформной долины į	проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
ыный состав донных отложений трансформной долины р	ых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
льный состав донных отложений трансформной долины į	ивых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
ральный состав донных отложений трансформной долины р	ловых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
неральный состав донных отложений трансформной долины į	валовых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
инеральный состав донных отложений трансформной долины į	за валовых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
Минеральный состав донных отложений трансформной долины р	иза валовых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
2. Минеральный состав донных отложений трансформной долины р	ализа валовых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
ца 2. Минеральный состав донных отложений трансформной долины <sub>[</sub>	анализа валовых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
<b>тица 2.</b> Минеральный состав донных отложений трансформной долины <sub>[</sub>	м анализа валовых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов
<b>іблица 2.</b> Минеральный состав донных отложений трансформной долины į	там анализа валовых проб методом рентгеновской дифрактометрии (весов

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

Колонка	Интервал, см	Кварц	Плагиоклаз	Кпш	Амфибол	Слюда	Смектит	Иллит	Хлорит	Каолинит	Кальцит	Прочее
AHC45-37	0-3	15	4	I	1		5	4	5	11	54	2 (гипс)
AHC45-37	3-4	12	4	4	I	I	8	5	9	15	46	I
AHC45-37	30-31	15	3		I	I	8	3	3	7	60	1 (гипс)
AHC45-37	40 - 41	20	4	7	4	I	11	5	7	15	27	I
AHC45-37	4849	21	5		2	11	17	3	20	21	I	I
AHC45-37	74-75	22	3	4	I	8	17	3	21	22	I	I
AHC45-37	93—94	20	4	4	I	6	14	4	23	21	I	I
AHC45-37	120-121	21	4	4	I	11	15	5	21	19	I	I
AHC45-37	145-146	24	4	4	I	6	13	5	22	19	I	I
AHC45-37	169 - 170	25	4	4	I	11	13	4	20	19	I	I
AHC45-37	185-186	25	3	4	I	12	13	4	21	18	I	I
AHC45-37	195-196	20	5	З	1	13	13	3	21	20	I	I
AHC45-37	220-221	22	3	4	Следы	12	15	4	21	19	I	I
AHC45-37	243—244	25	4	9	2	13	10	5	19	16	I	I
AHC45-37	249—250	21	5	5	2	11	15	4	20	17	I	I
AHC45-37	280-281	26	3	З	2	11	16	4	18	17	I	I
AHC45-37	305-306	24	4	З	Следы	8	15	4	22	20	I	I
AHC45-37	329–330	19	4	4	3	11	14	3	23	18	Ι	1 (пироксен)
AHC45-37	345346	27	4	4	1	10	15	3	20	16	I	I
AHC45-37	373374	37	8	9	I	Ι	8	13	13	12	I	3 (пироксен)
AHC45-48	3-4	14	6	4	I	I	10	4	7	14	40	I
AHC45-48	34-35	25	3	5	I	I	7	8	9	10	36	I
AHC45-48	40-41	57	7	7	1	Ι	2	3	5	2	16	I
AHC45-48	67—68	16	2	2	Ι	7	28	3	17	25	Ι	Следы (тальк)
AHC45-48	90—91	16	4	З	1	6	21	3	19	24	I	I
AHC45-48	112-113	15	3	З	I	6	21	3	23	23	I	I
AHC45-48	144—145	20	3	4	I	13	22	4	26	8	Ι	I
AHC45-48	177—178	21	2	2	Следы	6	21	2	22	21	I	1

## МИНЕРАЛОГИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

53

Таблица 2. О	кончание											
Колонка	Интервал, см	Кварц	Плагиоклаз	Кпш	Амфибол	Слюда	Смектит	ИЛЛИТ	Хлорит	Каолинит	Кальцит	Прочее
AHC45-48	220–221	22	4	3	I		20	5	20	25	I	1
AHC45-48	253-254	17	3	3	Следы	2	20	3	24	23	Ι	Следы (тальк)
AHC45-48	264-265	19	3	3	2	8	17	4	22	22	I	
AHC45-48	296–297	19	4	3	1	10	17	3	22	21	I	I
AHC45-48	310-311	21	4	4	1	9	20	2	22	20	Ι	Ι
AHC45-48	339-340	45	16	7	9	10	3	3	7	3	Ι	I
AHC45-48	350-351	18	ß	2	I	I	8	5	9	11	42	5 (сидерит)
AHC45-48	358-359	7	2		I	I	Ι	3	Следы	2	82	4 (сидерит)
AHC45-48	370–371	21	4	4	I	Ι	20	~	14	28	Ι	1 (гипс)
AHC45-48	383-384	53	11	7	Следы	11	3	ю	9	9	Ι	Следы (тальк)
AHC45-48	405-406	25	3	4	I	3	10	5	20	30	Ι	I
АИ-4125 дч	3-4	16	4	2	I	7	14	3	15	19	20	I
АИ-4126 СС	1–2	35	3	5	3	15	10	5	13	11	I	Сульфиды
АИ-4126 СС*	1-2, охристые зерна	31	11	5	c,	10	I	9	14	8	Ι	12 (cepa)
АИ-4126 СС*	1—2, черные стяжения	28	7	7	I	17	I	4	13	6	I	10 (сера), 5 (сульфиды)
АИ-4126 СС*	1–2, форами- ниферы				Светлы	le — калы	цит, темные	— калыц	ит с глинаі	ИИ		
АИ-4126 СС	9–10	30	13	2	3	15	8	5	10	8	I	сульфиды
АИ-4127 СС	0 - 1	29	S	5	2	11	11	З	18	16	I	сульфиды
АИ-4127 СС*	0—1, черные стяжения		_	-	-	_	Сульфид	ŢЫ	-			
АИ-4127 СС	9–10	29	3	3	3	13	11	4	18	16	Ι	I
Примечание дл	чя всех таблиц: * —	отобрано	под бинокулярс	.MC								

54

МУРДМАА и др.

результатам анализа валовых	
1 <i>р.</i> Амазонки пс	
и конуса выноса	c.%)
ы разлома Вима	oe Bellectbo, Bel
формной долин	на бескарбонатн
тожений транс	грии (пересчет н
остав донных от	ой дифрактомет
Иинеральный с	ом рентгеновски
Таблица З. 1	проб метод

Станция	Интервал, см	Кварц	Плагиоклаз	Кпш	Амфибол	Слюда	Смектит	Иллит	Хлорит	Каолинит	<b>У</b> глинистых	Прочее
AHC45-37	0-3	33	6	I	I	I	11	6	11	24	54	4 (гипс)
AHC45-37	3-4	22	7	7	I	I	15	6	11	28	63	Ι
AHC45-37	30 - 31	38	8	I	Ι	I	20	~	8	18	53	2 (гипс)
AHC45-37	40-41	27	5	10	5	I	15	7	10	21	52	Ι
AHC45-37	4849	21	5		2	11	17	3	20	21	61	Ι
AHC45-37	74–75	22	3	4	I	8	17	3	21	22	63	Ι
AHC45-37	93–94	20	4	4	I	6	14	4	23	21	62	Ι
AHC45-37	120-121	21	4	4	I	11	15	5	21	19	60	Ι
AHC45-37	145-146	24	4	4	I	6	13	5	22	19	59	Ι
AHC45-37	169–170	25	4	4	I	11	13	4	20	19	56	Ι
AHC45-37	185-186	25	3	4	Ι	12	13	4	21	18	56	Ι
AHC45-37	195-196	20	5	З	1	13	13	3	21	20	57	Ι
AHC45-37	220-221	22	3	4	Следы	12	15	4	21	19	59	Ι
AHC45-37	243—244	25	4	9	2	13	10	5	19	16	50	Ι
AHC45-37	249–250	21	5	5	2	11	15	4	20	17	56	Ι
AHC45-37	280-281	26	3	Э	2	11	16	4	18	17	55	Ι
AHC45-37	305-306	24	4	Э	Следы	~	15	4	22	20	61	Ι
AHC45-37	329–330	19	4	4	б	11	14	ю	23	18	58	1 (пироксен)
AHC45-37	345346	27	4	4	1	10	15	ŝ	20	16	54	I
AHC45-37	373-374	37	8	9	I	I	8	13	13	12	46	3 (пироксен)
AHC45-37	среднее	25	S	4	1	×	14	Ś	18	19	57	Ι
AHC45-48	3-4	23	10	7	Ι	Ι	17	7	12	23	58	Ι
AHC45-48	34-35	39	5	8	I	I	11	13	6	16	48	I
AHC45-48	40-41	68	8	8	1	Ι	2	4	9	2	14	Ι
AHC45-48	67—68	16	2	2	I	7	28	Э	17	25	73	Следы (тальк)
AHC45-48	90—91	16	4	З	1	6	21	б	19	24	67	I
AHC45-48	112–113	15	3	З	I	6	21	3	23	23	70	I
AHC45-48	144—145	20	3	4	I	13	22	4	26	8	09	I

## МИНЕРАЛОГИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Таблица 3. Око	ончание											
Станция	Интервал, см	Кварц	Плагиоклаз	Кпш	Амфибол	Слюда	Смектит	Иллит	ТидоцХ	Каолинит	<b>Г</b> глинистых	Прочее
AHC45-48	177–178	21	2	7	Следы	6	21	2	22	21	99	I
AHC45-48	220-221	22	4	ŝ	Ι	I	20	5	20	25	70	Ι
AHC45-48	253–254	17	3	3	Следы	7	20	3	24	23	70	Следы (тальк)
AHC45-48	264-265	19	3	3	2	8	17	4	22	22	65	I
AHC45-48	296–297	19	4	б	1	10	17	3	22	21	63	Ι
AHC45-48	310-311	21	4	4	1	9	20	2	22	20	64	Ι
AHC45-48	339–340	45	16	7	9	10	ю	3	7	3	16	Ι
AHC45-48	350-351	31	5	б	Ι	I	14	6	10	19	52	9 (сидерит)
AHC45-48	358-359	39	11	I	Ι	I	I	17	Следы	11	28	22 (сидерит)
AHC45-48	370–371	21	4	4	Ι	I	20	8	14	28	70	1 (гипс)
AHC45-48	383-384	53	11	7	Следы	11	ю	3	9	9	18	Следы (тальк)
AHC45-48	405-406	25	3	4	I	3	10	5	20	30	65	Ι
AHC45-48	Среднее	28	9	4	1	5	15	5	16	18	55	Ι
АИ-4125 дч	3-4	20	5	б	0	6	18	4	19	24	64	Ι
АИ-4126 CC	1–2	35	3	5	3	15	10	5	13	11	39	Сульфиды
АИ-4126 СС*	1-2, охри- стые зерна	31	11	5	3	10	I	9	14	8	28	12 (cepa)
АИ-4126 СС*	1—2, черные стяжения	28	Ľ	٢	I	17	I	4	13	6	26	10 (cepa), 5 (сульфиды)
АИ-4126 CC*	1–2, фора- миниферы				Све	TJIME — 1	кальцит, тем	иные — ка	лыцит с глі	инами		
АИ-4126 СС	9–10	30	13	7	3	15	~	5	10	8	31	Сульфиды
АИ-4127 CC	0 - 1	29	5	5	2	11	11	З	18	16	48	Сульфиды
АИ-4127 CC*	0—1, черные стяжения						Сул	ьфиды				
АИ-4127 CC	9–10	29	3	3	3	13	11	4	18	16	49	Ι

56

МУРДМАА и др.



**Рис. 6.** Дифрактограммы образцов донных осадков колонок (а) АНС45-37 из восточной и (б) АНС45-48 из западной части долины трансформного разлома Вима, (в) образцов донных осадков из района конуса выноса реки Амазонки.

Таблица 4. Соотношение глинистых минералов в пересчете на условные 100%

Колонка	Интервал, см	смектит/ ∑глини- стых, вес.%	иллит/ ∑глини- стых, вес.%	хлорит/ ∑глини- стых, вес.%	каолинит/ ∑глини- стых, вес.%
AHC45-37	0-3	20	16	20	44
AHC45-37	3-4	24	15	18	44
AHC45-37	30-31	38	14	14	33
AHC45-37	40-41	29	13	18	39

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

## МУРДМАА и др.

Таблица 4. Окончание

Колонка	Интервал, см	смектит/ ∑глини- стых вес %	иллит/∑глини- стых вес%	хлорит/ ∑глини- стых вес %	каолинит/ <u>Σ</u> глини-
AHC45-37	48-49	28	5	33	34
AHC45-37	74-75	27	5	33	35
AHC45-37	93-94	23	6	37	34
AHC45-37	120-121	25	8	35	32
AHC45-37	145-146	22	8	37	32
AHC45-37	169-170	23	7	36	34
AHC45-37	185-186	23	7	38	32
AHC45-37	195-196	23	5	37	35
AHC45-37	220-221	25	7	36	32
AHC45-37	243-244	20	10	38	32
AHC45-37	249-250	27	7	36	30
AHC45-37	280-281	29	7	33	31
AHC45-37	305-306	25	7	36	33
AHC45-37	329-330	24	5	40	31
AHC45-37	345-346	28	6	37	30
AHC45-37	373-374	17	28	28	26
AHC45-37	Среднее	25	9	32	34
AHC45-48	3-4	29	11	20	40
AHC45-48	34-35	23	26	19	32
AHC45-48	40-41	17	25	42	17
AHC45-48	67–68	38	4	23	34
AHC45-48	90-91	31	4	28	36
AHC45-48	112–113	30	4	33	33
AHC45-48	144—145	37	7	43	13
AHC45-48	177-178	32	3	33	32
AHC45-48	220-221	29	7	29	36
AHC45-48	253-254	29	4	34	33
AHC45-48	264-265	26	6	34	34
AHC45-48	296-297	27	5	35	33
AHC45-48	310-311	31	3	34	31
AHC45-48	339-340	19	19	44	19
AHC45-48	350-351	27	17	20	37
AHC45-48	358-359	_	60	_	40
AHC45-48	370-371	29	11	20	40
AHC45-48	383-384	17	17	33	33
AHC45-48	405-406	15	8	31	46
AHC45-48	Среднее	28	10	29	34
АИ-4125, дч	3-4	27	6	29	37
АИ-4126, СС	1-2	26	13	33	28
АИ-4126, СС	9-10	26	16	32	26
АИ-4127, СС	0-1	23	6	38	33
АИ-4127, СС	9-10	22	8	37	33

В обеих колонках из долин разлома Вима средние величины минерального состава и соотношения глинистых минералов нарушаются в «известковых шапках» (в верхних 35 см колонки АНС45-37 и 58 см колонки АНС45-48) (см. рис. 2–5). В колонке АНС45-37 содержание биогенного кальцита максимально (60%) в нижней анализированной пробе «известковой шапки». В пересчитанной на бескальцитовое вещество пробе сумма глинистых минералов показывает небольшой минимум, а кварц — отчетливый максимум, что соответствует более крупнозернистому составу осадка. Кварц, наряду с раковинами фораминифер, образует относительно крупнозернистый базальный слой

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

«известковой шапки». Вместе с кварцем немного выше среднего также содержание плагиоклаза. Обращает на себя внимание максимум амфибола в базальном слое «известковой шапки». Остальная часть колонки минералогически довольно однородная, кроме самого низа. Аналогичные изменения проявлены в «известковой шапке» колонки AHC45-48. Минимум суммы глинистых минералов соответствует резкому максимуму кварца (68%), а вместе с ним плагиоклаза и КПШ. Присутствует амфибол. Все эти экстремумы относятся к базальному слою «известковой шапки».

Соотношения глинистых минералов, рассчитанные в процентах от их суммы (см. рис. 5, табл. 4), показывают аномалии от средних концентраций в верхнем и нижнем интервалах известковых осадков колонки АНС 45-48. На востоке долины Вима (см. рис. 4, табл. 4), судя по колонке АНС45-37, в «известковой шапке» преобладают хлорит и каолинит, как и в средних величинах по длине колонки (32 и 34% соответственно). В колонке АНС45-48 средние содержания хлорита (29%) и каолинита (33%) также выше, чем других глинистых минералов. Среднее содержание смектита в обеих колонках одинаковое (26%) при диапазоне изменчивости 20-38% в колонке АНС45-37 и несколько шире -15-38% в колонке АНС45-48, если исключить нулевое значение необычной пробы 358-359 см. Наряду с этой пробой высокие содержания в обеих колонках встречаются чаще в известковых интервалах (см. табл. 4). Средние содержания иллита в колонках AHC45-37 и AHC45-48 равны 9 и 13%. а пределы изменчивости составляют 3-16 и 3-60% соответственно. Проба 358-359 см со столь высокой концентрацией иллита, а также значениями смектита и хлорита ниже порога обнаружения, содержит 82% биогенного кальцита и представляет собой горизонт, сформировавшийся в иных локальных условиях осадконакопления.

В пяти пробах конуса выноса Амазонки (АИ-4126, АИ-4127) и примыкающей к нему с севера абиссальной равнины (АИ-4125) преобладают хлорит и каолинит (29–38 и 28–37% соответственно), немного меньше смектита (22–27%) и минимальное содержание иллита (6–16%) (см. табл. 4).

Биогенные минералы. Из осадкообразующих минералов в осадках изученных колонок (как и вообще в большинстве океанских осадков) биогенное происхождение имеют кальцит и опал А (или аморфный кремнезем). Кальцит, конечно, может быть и терригенный, но в наших колонках из открытого океана нахождение терригенного кальцита маловероятно. Опал А практически всегда биогенный.

Содержание биогенного кальцита, представленного в четвертичных отложениях преимущественно раковинами планктонных фораминифер и кокколитами, а также их обломками, по данным рентгено-дифракционного анализа колеблется в пределах 0–60% в колонке АНС45-37 и 0–82% в колонке

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

АНС45-48 (см. табл. 1, рис. 2). Выделяется так называемая «известковая шапка» пелагических осалков. обогашенных биогенным калыштом. связанная с углублением критической глубины карбонатонакопления (КГК) в тропической Атлантике в голоцене [52]. Соотношение фораминиферового и кокколитового кальцита оценено примерно по данным изучения смер-слайдов (рис. 7, 8). Хотя частота встречаемости обоих компонентов биогенного кальцита определена в условных единицах (v.e.), кокколитовый компонент явно преобладает над фораминиферовым в обеих колонках, что приблизительно соответствует первичному планктоногенному происхождению этих форм биогенного кальцита, не нарушенному механической сортировкой. В терригенных осалках под «известковой шапкой» небольшая примесь биогенного кальцита представлена часто только кокколитами.

Опал А слагает минеральные элементы радиолярий, диатомовых и спикулы кремневых губок. Содержание их ничтожно мало и оценено в смер-слайдах только в категориях есть-нет (см. рис. 7, 8). В ряде смер-слайдов опаловая микрофауна и микрофлора не найдены. Относительно малая концентрация опала А в близкой к приэкваториальной зоне повышенной биопродуктивности [6] очевидно объясняется сильным разбавлением тонкозернистым терригенным материалом в мощном осадочном теле трансформной долины Вима. Продукция аморфного кремнезема не в состоянии преодолеть быстрое накопление терригенного материала. Любопытна частая встречаемость в смер-слайдах спикул кремневых губок (рис. 96, в), которые вероятно растут на ограничивающих долину Вима хребтах.

Комплексы планктонных фораминифер (ПФ) представлены ныне живущими тропическими видами и видами широкого распространения. Состав комплексов и присутствие индекс-видов *Globigerinoides ruber* (pink) и *Globorotalia trancatulinoides* указывает на четвертичный (скорее всего послеледниковый) возраст. Единично встречаются переотложенные неогеновые виды: *Globorotalia exilis*, *Dentaglobigerina altispira*, *Neogloboquadrina humerosa* и другие. В смер-слайдах наряду с единичными современными кокколитами отмечены редкие дискоастеры: *D. broweri и D. pentaradiatus* (рис. 9а, г).

Отложения терригенной толщи, начиная с переходного слоя колонки AHC45-37 (ниже 36 см) и под кварцево-слюдистым песком в колонке AHC45-48 (ниже 48 см), практически не содержат раковин ПФ. Единственным исключением (из изученных) является обогащенный кальцитом прослой 357–358 см колонки AHC45-48 с высоким содержанием мелких раковин ПФ, преимущественно ныне живущих. Здесь также встречено небольшая примесь переотложенных неогеновых видов, в том числе Globigerinoides obliquus, Neogloboquadrina humerosa, Neogloboquadrina acostaensis.

#### МУРДМАА и др.



Рис. 7. Содержание биогенных компонентов в колонке АНС45-37 в условных единицах (у.е.).



Рис. 8. Содержание биогенных компонентов в колонке АНС45-48 в условных единицах (у.е.).

Аутигенные минералы. Наряду с терригенным комплексом в составе осадочного материала диагностированы аутигенные минералы (см. табл. 2). Несколько процентов несомненно аутигенного (позднедиагенетического) гипса идентифицировано в «известковой шапке» обеих колонок из трансформной долины Вима. Кроме того, вероятно аутигенное происхождение ряда других минералов, встреченных в нижней части колонки AHC45-48 в интервале 349-384 см: сидерита, хлорапатита, гидроксилапатита, серы S<sub>8</sub>. Весьма вероятно, в некоторых горизонтах присутствует



**Рис. 9.** Микрофотографии смер-слайдов с изображением разных биоморфных объектов, состоящих из кальцита (а, г) и опала А (б, в). а — *Discoaster broweri*, AHC45-37, 20 см; б — спикула, AИ-4126, забой; в — спикула, AHC45-48, 40 см; г — *Discoaster pentaradiatus*, AHC45-37, 10 см.

тальк, в следовом количестве диагностированный по дифракционному максимуму d = 9.2Å. В верхней части колонки AHC45-37 определены характерные для окислительных условий минералы — гетит, лепидокрокит, акагенит. В изученных осадках конуса выноса Амазонки диагностирован специфический минеральный комплекс, связанный, по-видимому, с восстановительными условиями осадконакопления в осевой зоне конуса. Это сульфидные стяжения, в состав которых входит грейгит Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>, сера S<sub>8</sub> и другие сульфиды железа.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление результатов рентгеновского фазового анализа минерального состава терригенного компонента двух колонок из восточной (AHC45-37) и западной (AHC45-48) частей трансформной долины Вима показало их близкое сходство между собой, что доказывает единство источника сноса. В то же время полученные для осадков конуса выноса Амазонки средние процентные содержания основных компонентов — кварца (29–33%) и суммы гли-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

нистых минералов (49–63%, см. табл. 2) близки средним величинам содержания этих компонентов в колонках осадков долины Вима. Это позволяет считать переотложенные осадки конуса выноса Амазонки главным источником терригенного материала для запада и востока долины разлома Вима. Экстремальные величины обоих главных компонентов, скорее всего, связаны с локальными условиями седиментации.

По терригенному минеральному составу осадки из восточной части трансформной долины (колонка AHC45-37) и западной части (AHC45-48) в целом однотипные и сходны с четырьмя пробами из конуса выноса Амазонки (станции AИ-4126, AИ-4127, см. табл. 3). Следовательно, нет сомнения, что трансформная долина Вима заполняется терригенным материалом из выносов Амазонки. Такое утверждение не опровергается заметными колебаниями как общего минерального состава (см. рис. 2, 3), так и соотношениями глинистых минералов (см. рис. 4, 5) по длине обеих изученных колонок. Даже при сопоставлении средних содержаний четырех глинистых минералов в восточной (колонка AHC45-37) и западной (колонка AHC45-48) частях долины (см. табл. 4) бросается в глаза соответствие предполагаемого источника — конуса выноса Амазонки и конечного результата — осадочного заполнения долины Вима. В ходе перемыва от устья реки Амазонки до конуса происходило, вероятно, частичное селективное осаждение крупнозернистого материала, и осадки конуса обогатились суммой глинистых минералов, что в ходе дальнейшего переноса в придонных облаках взвеси уже существенно не менялось (см. табл. 3).

Таким образом, соотношение глинистых минералов (см. табл. 4) следует считать наиболее надежным критерием источника терригенного материала не только для данного случая долины разлома Вима. Присутствие небольшого количества пироксенов в нижней части колонки АНС45-37 (см. табл. 3) может быть связано с эрозией вулканических пород, ограничивающих долину хребтов.

Однако прямая связь потока ААДВ в долине Вима с конусом Амазонки и роль этого потока в транспорте терригенной взвеси до сих пор не установлены. Не доказана также прямая связь между каналами системы конуса выноса Амазонки и долиной разлома Вима.

Северо-Бразильское течение способствуют активному вдольсклоновому переносу взвешенного материала из реки Амазонки на северо-запад (см. рис. 1б). Предполагается, что накопление этого материала на континентальном склоне в районе турбидитовой системы Ориноко (на широте, близкой к широте долины разлома Вима) у устья одноименной реки, также как и взвешенного материала последней, провоцирует неустойчивость склона и сход гравитационных потоков [18, 19]. Эти потоки движутся в генеральном направлении с запада на восток через абиссальную равнину Демерара по системе каналов, поставляя материал в западную часть разлома Вима [32, 49]. На 51-53° з.д. связанные с турбидитовой системой Ориноко каналы резко поворачивают на север и пересекают разлом Вима почти перпендикулярно его оси [15, 18, 19]. Здесь материал гравитационных потоков, вероятно, подхватывается течением ААДВ, которое способствует выравниванию минерального состава терригенной толщи в долине и, в частности, в двух изученных колонках (см. рис. 6а, б). Однако главной причиной сходства минерального состава двух колонок является общий источник терригенного материала — выносы рек Амазонки и Ориноко.

Меандрирующий канал, где взята колонка АНС45-48, мог вначале формироваться в результате деятельности турбидных потоков, а после снижения их активности использовался струей придонного течения. При этом сохранилось первичное соотношение глинистых минералов, но формировалась более контрастная, чем в колонке AHC45-37, минералогическая слоистость основных компонентов.

Возможна и более сложная гипотеза. Она предполагает движение придонных облаков взвеси с торможением через ограничивающие долину разлома хребты, где происходит частичное осаждение и смешивание с биогенным кальцитом.

Некоторые авторы считают Анды основным источником терригенного материала выносов Амазонки (например, [21, 22, 28, 30, 37, 47]. Наши ланные, особенно по глинистым минералам, позволяют предположить, что не меньшее значение имеет размыв продуктов гумидного тропического выветривания в нижнем течении Амазонки. Прежде всего, обращает на себя внимание очень высокое кварц/ полевошпатовое (особенно кварц/ плагиоклазовое) отношение (см. табл. 3), явно не свойственное осадочным и вулканогенным отложениям молодых складчатых поясов типа Анд. Не зря преобладающие вулканические породы Анд названы андезитами. Обогащение кварцем, наоборот, один из характерных признаков продуктов тропического выветривания и почвообразования, где кварц является наиболее массовым остаточным продуктом [1, 6]. Высокое кварц/ плагиоклазовое отношение получено по средним значениям обеих изученных колонок (5.0 и 5.4), а также по анализированным для сравнения пробам конуса Амазонки (4.0-7.2).

Вторым по обилию после кварца терригенным минералом следует считать слюду (без подразделения), содержание которой в большинстве проб обеих колонок колеблется в пределах 8-13%(см. табл. 2, 3). Однако значения ниже порога обнаружения в нескольких образцах из известковых слоев обеих колонок приводят к тому, что средние содержания слюд довольно низкие (5% на западе и 8% на востоке, см. табл. 3). Причину этих низких значений еще придется выяснять, тем более что осадки конуса Амазонки содержат в среднем 11-15% слюды (см. табл. 3).

Помимо биологической продуктивности преимущественно в поверхностных водах, источником биогенных минералов является эрозия осадков, ограничивающих долину хребтов на пути придонных облаков взвеси. Об этом свидетельствует присутствие неоген-раннечетверичных дискоастеров и раковин ПФ в обеих колонках. Скорее всего, они попадают в долину в результате эрозии северного и южного хребтов с последующим смывом известкового биогенного материала турбидными потоками. Косвенно в пользу такого предположения свидетельствует наличие спикул губок, растущих преимущественно на подводных склонах. Кроме того, пироксен, обнаруженный в двух пробах колонки AHC45-37 (см. табл. 2), возможно является продуктом эрозии и гравитационного переноса вулканических пород южного хребта.

В изученных колонках и осадках конуса выноса Амазонки диагностированы аутигенные минералы: гипс, сидерит, хлорапатит, гидроксилапатит, сера  $S_8$ , сульфиды, гетит, лепидокрокит и акагенит, скорее всего, диагенетического происхождения. Разбор физико-химических условий их образования не входит в задачи данной статьи. Следует отметить, что обнаруженные минералы и минеральные комплексы указывают на специфические физико-химические условия раннего диагенеза. В ряде проб из западной колонки обнаружен тальк, входящий в группу тальк-пирофилит. Пирофилит ранее был определен в осадках реки Ориноко [13].

Некоторые расхождения с полуколичественными данными, полученными другими исследователями [13, 14, 16], объясняется, по-видимому, выбором методических подходов к изучению вещественного состава.

### выводы

Сопоставление среднего минерального состава осадков (терригенные минералы) в двух колонках из восточной части долины разлома Вима и глубоководного канала в ее западной части показало близкое сходство содержания основных осадкообразующих минералов. Сходно также среднее соотношение четырех глинистых минералов с преобладанием хлорита и каолинита, подчиненным содержанием смектита и подчиненного в количественном отношении иллита. Это свидетельствует о едином источнике терригенного материала. Сравнение с минеральным составом конуса выноса Амазонки однозначно доказывает, что основным источником терригенного материала четвертичных осадков долины трансформного разлома Вима на всем ее протяжении служит твердый сток реки Амазонка и отчасти, предположительно, реки Ориноко.

Терригенный материал поступает в долину Вима из конуса Амазонки, вероятно, в результате совместного действия гравитационных потоков с континентального склона Южной Америки и потока ААДВ, транспортирующего материал в виде придонных облаков взвеси. В ходе транспорта в него попадают биогенные минералы, главным образом кальцит ПФ, за счет вертикального осаждения из водной толщи, а также эрозии (перемыва) известковых осадков на ограничивающих долину Вима хребтах. Об этом свидетельствует небольшая примесь в фауне ПФ

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

неогеновых видов, а также находки вымерших в раннечетвертичное время дискоастеров.

Внутри долины Вима мощные потоки ААДВ переносят осадочный материал с запада на восток, обеспечивая выравнивание среднего минерального состава осадков двух колонок.

Такая система седиментации долины Вима отражает в минеральном составе четвертичных осадков влияние двух главных первичных источников терригенного материала — эрозию Анд и продуктов гумидного тропического выветривания.

В известковых слоях двух колонок впервые обнаружены аутигенные (диагенетические) минералы, в том числе довольно обильный (до 22%) сидерит в колонке AHC45-48. В осадках конуса выноса Амазонки впервые идентифицирован грейгит.

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам Отряда литологии 60-го рейса НИС «Академик Иоффе» за помощь в отборе колонок для данного исследования.

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-27-00421).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горбунова З.Н. Глинистые и другие высокодисперсные минералы в осадках Тихого океана // Тихий океан. Кн. 1. Осадкообразование в Тихом океане. М.: Наука, 1970. С. 373–405.
- 2. Демидов А.Н., Добролюбов С.А., Морозов Е.Г. и др. Перенос придонных вод через разлом Вима Срединно-Атлантического хребта // Докл. РАН. 2007. Т. 416. № 3. С. 395–399.
- 3. Демидов А.Н., Иванов А.А., Гиппиус Ф.Н., Добролюбов С.А. Перенос глубинных и донных вод через Срединно-Атлантический Хребет в разломе Вима // Докл. РАН. 2020. Т. 494. № 1. С. 76–81.
- 4. Иванова Е.В., Сколотнев С.Г., Борисов Д.Г. и др. Комплексные исследования зон трансформных разломов Долдрамс и Вима в 45-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Николай Страхов»// Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 488–490.
- 5. Иванова Е.В., Борисов Д.Г., Демидов А.Н. и др. Исследования осадконакопления и характеристик водных масс Тропической Атлантики в 60-м рейсе НИС «Академик Иоффе» // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 670–672.
- 6. *Лисицын А.П.* Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 483 с.
- Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Под ред. Г. Брауна. М.: Мир, 1965. 600 с.
- Рентгенография основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силика-

ты) / Под ред. В.А. Франк-Каменецкого. Л.: Недра. 1983. 359 с.

- 9. Bader R.G., Gerard R.D., Benson W.E. et al. Site 26 // Initial Reports. Deep Sea Drilling Project. Leg 4. 1970. P. 77–92.
- Barretto H.T., Summerhayes C.P. Oceanography and suspended matter off northeastern Brazil // Journal of Sedimentary Petrology. 1975. V. 45. P. 822–833.
- 11. *Biscaye P.E.* Mineralogy and sedimentation of recent deep sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans // Geol. Soc. America Bulletin. 1965. V. 76. P. 803–832.
- 12. Bonatti E., Ligi M., Gasperini L. et al. Imaging crustal uplift, emersion and subsidense at Vema Fracture Zone // EOS. Transactions, AGU. 1993. V. 75. № 32. P. 371–372.
- Bowels F.A. Fleisher P. Orinoco and Amazon River Sediment Input to the Eastern Caribbean Basin // Marine Geology. 1985. V. 68. P. 53–72.
- Debrabant P., Lopez M., Chamley H. Clay Mineral Distribution and Significance in Quaternary Sediments of the Amazon Fan // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results // Flood R.D., Piper D.J.W., Klaus A., Peterson L.C. (Eds.). 1997. V. 155. P. 177–192.
- 15. *Deville E., Mascle A., Callec Y. et al.* Tectonics and sedimentation interactions in the east Caribbean subduction zone: An overview from the Orinoco delta and the Barbados accretionary prism // Marine and Petroleum Geology. 2015. V. 64. P. 76–103.
- Eisma D., van der Gaast S.J., Martin J.M., Thomas A.J. Suspended matter and bottom deposits of the Orinoco delta: Turbidity, mineralogy and elementary composition // Netherlands Journal of Sea Research. 1978. V. 12. P. 224–251.
- 17. *Eittreim S.L., Biscaye P.E., Jacobs S.S.* Bottom-Water Observations in the Vema Fracture Zone // Journal of Geophysical Research. 1983. V. 88. P. 2609–2614.
- Ercilla G., Alonso B., Baraza J. et al. New highresolution acoustic data from the 'braided system' of the Orinoco deep-sea fan // Marine Geology. 1998. V. 146. P. 243–250.
- Ercilla G., Alonso B., Wynn R.B., Baraza J. Turbidity current sediment waves on irregular slopes: observations from the Orinoco sediment wave field // Marine Geology. 2002. V. 192. P. 171–187.
- Fagel N. Marine Clay Minerals, Deep Circulation and Climate // Developments in Marine Geology. 2007. V. 1. P. 139–184.
- Filizola N. O Fluxo de Sedimentos em Suspensão nos Rios da Bacia Amazônica Brasileira. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 1999. 63 p.
- 22. *Filizola N*. Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens. Thèse de doctorat, Université P. Sabatier, Toulouse, 2003. 292 p.
- 23. Fischer J., Rhein M., Schott F., Stramma L. Deep water masses and transports in the Vema Fracture Zone // Deep Sea Research: Part I. 1996. V. 43. № 7. P. 1067– 1074.

- 24. Flood R.D., Piper D.J.W., Klaus A., Peterson L.C. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 1997. V. 155.
- 25. *Frey D.I., Morozov E.G., Fomin V.V. et al.* Regional modeling of Antarctic bottom water flows in the key passages of the Atlantic // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. Issue 11. P. 8414–8428.
- 26. Friedman G.M., Sanders F.E. Principles of sedimentology. New York: Wiley, 1978. 792 p.
- 27. GEBCO Compilation Group (2020) GEBCO 2020 Grid.
- Gibbs R.J. The geochemistry of the Amazon River system, part 1. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids // Geol. Soc. America Bulletin. 1967. V. 78. P. 1203–1232.
- Grousset F., Latouche C., Maillet N. Clay minerals as indicators of wind and current contribution to postglacial sedimentation on the Azores/Iceland Ridge // Clay Minerals. 1983. V. 18. P. 65–75.
- 30. *Guyot J.L.* Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Paris: ORSTOM, 1993. 261 p.
- Guyot J.L., Jouanneau J.M., Soares L. et al. Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin // Catena. 2007. V. 71. P. 340–356.
- 32. *Heezen B.C., Gerard. R.D., Tharp M.* The Vema Fracture Zone in the Equatorial Atlantic // Geophys. Res. 1964. V. 69. P. 733–739.
- 33. *Hemming S.R., Biscayea P.E., Broecker W.S. et al.* Provenance change coupled with increased clay flux during deglacial times in the western equatorial Atlantic // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1998. V. 142. P. 217–230.
- 34. *Kastens K.A., MacDonald K.C., Miller S.P.* Deep Tow Studies of the Vema Fracture Zone. Evidence for Tectonism and Bottom Currents in the Sediments of the Transform Valley Floor // Journal of Geophysical Research. 1986. V. 91. № 3. P. 3355–3367.
- 35. Lagabrielle Y., Mamaloukas-Frangoulis V., Cannat M. et al. Vema fracture zone (Central Atlantic): Tectonic and magmatic evolution of the median ridge and the eastern ridge-transform intersection domain // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1992. V. 97. № 12. P. 17331–17351.
- 36. McCartney M.S., Bennet S.L., Woodgate-Jones M.E. Eastward flow through the Mid-Atlantic Ridge at 11° N and its influence on the abyss of the eastern basin // Journal of Physical Oceanography. 1991. V. 21. № 8. P. 1089–1121.
- Meade R.H. Suspended sediment in the Amazon River and its tributaries in Brazil during 1982-84 // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1985. V. 85-492. 39 p.
- Meade R.H. Suspended Sediments of The Modern Amazon and Orinoco Rivers // Quaternary International. 1994. V. 21. P. 29–39.

- 39. *Moore D.M., Reynolds R.C.* X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. New York: Oxford University Press, 1997. 380 p.
- 40. *Morozov E., Demidov A., Tarakanov R., Zenk W.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows. Springer, 2010. 266 p.
- Petschik R., Kuhn G., Gingele F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography // Marine Geology. 1996. V. 130. P. 203–229.
- 42. *Prinz M., Keil K., Green J.A. et al.* Ultramafic and mafic dredge samples from the Equatorial Mid-Atlantic Ridge // Journal of Geophysical Research. 1976. V. 81. № 13. P. 4087–4103.
- 43. *Rex R.W., Murray B.* X-Ray Mineralogy Studies, Leg 4 // Initial Reports. Deep Sea Drilling Project. Leg 4. 1970. P. 325–369.
- 44. *Rhein M., Stramma L., Krahmann G.* The spreading of Antarctic Bottom Water in the tropical Atlantic // Deep Sea Research. Part I. 1998. V. 45. P. 507–527.
- 45. Ryan W.B.F., Carbotte S.M., Coplan J. et al. Global Multi-Resolution Topography (GMRT) synthesis data set // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2009. V. 10. № 3. Q03014.
- 46. *Stallard R.F., Edmond J.M.* Geochemistry of the Amazon. 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load // Journal of Geophysical Research. 1983. V. 88. № C14. P. 9671–9688.

- 47. *Stein R.M.* Schwenmineraluntersuehungen an Flussprooben des Amazonas und seiner wichtigsten Nebenflüsse. Hauptpriifung Mineralogie. Heidelberg, F.R.G.: Institut Wr Sedimentforschung, 1979. 74 p.
- 48. Van Andel T.H., Corliss J.B., Bowen V.T. The intersection between the Mid-Atlantic Ridge and the Vema Fracture Zone in the North Atlantic // Marine Res. 1967. V. 25. P. 343–351.
- 49. Van Andel T.H., Komar P. Ponded Sediments of the Mid-Atlantic Ridge between 22° and 23° North Latitude // Geological Society of America Bulletin. 1969. V. 80. № 7. P. 1163–1190.
- 50. Van Andel T., von Herzen R., Phillips I. The Vema Fracture Zone and the tectonics of transverse shear zones in oceanic crustal plates // Mar. Geophys. Res. 1971. V. 1. № 3. P. 78–97.
- Vangriesheim A. Antarctic Bottom Water flow through the Vema Fracture Zone // Oceanol. Acta. 1980. V. 3. P. 199–207.
- Volat J.-L., Pastouret L., Vergnaud-Grazzini C. Dissolution and carbonate fluctuations in Pleistocene deep-sea cores: A review // Marine Geology. 1980. V. 34. P. 1–28.
- Wahsner M., Muller C., Stein R. et al. Clay indicator for source areas and transport pathways — a synthesis // Boreas. 1999. V. 28. P. 215–233.

## MINERALOGY OF QUATERNARY SEDIMENTS FROM THE VALLEY OF VEMA FRACTURE ZONE (CENTRAL ATLANTIC)

## I. O. Murdmaa, O. M. Dara, M. A. Lykova, D. G. Borisov, E. V. Ivanova

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The content of sediment forming minerals in two cores from the eastern (ANS45-37) and western (ANS45-48) parts of the Vema transform fault valley is studied using the semi-quantitative XRD analysis of bulk powder sediment samples. The mineral composition of deep-sea sediments from the Amazone cone is also analyzed for comparison. It appeared that the average composition of the terrigenous component of both cores (according to prevailing quartz, secondary mica, plagioclase and potassium feldspar, as well as smectite, chlorite, kaolinite, illite) is quite similar and approximately corresponds to the composition of sediments from the Amazon cone. The ratio of four clay minerals suggests the supply of terrigenous material to the Amazon and Orinoco due to the erosion of the Andes and humid tropical weathering in the lower course of the rivers with further transportation of the suspended load to the ocean. This material was transported to the Vema transform valley due to the interplay between the gravity flows from the South American continental slope and the current of the Antarctic Bottom Water. Data on biogenic calcite (planktic foraminiferal tests, nannofossils) and opal A (radiolarians, sponge spicules) are obtained in addition. In the study area, several authigenic (diagenetic) minerals are identified. In particular, siderite and greigite are first found in the sediments from the Vema valley and Amazon cone, respectively.

**Keywords:** clay minerals, terrigenous, biogenic and autigenic minerals, Antarctic Bottom Water, gravity flows, microfossils, Amazon River, Orinoco River, Andes, tropical weathering