

УДК 551.35: 551.79

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-3-54-58

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ИНДИЙСКОГО И АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНОВ

Михаил Аркадьевич Левитан

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; m-levitan@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0012-3708>

Аннотация. Проведено сравнение геохимических особенностей плейстоценовых отложений Индийского и Атлантического океанов. Для расчета их среднего химического состава использованы результаты 20 000 элементоопределений для осадков каждого из океанов. Установлено, что в среднем осадки Атлантики более карбонатны, чем плейстоценовые отложения Индийского океана (32,17 мас.% CaCO_3 по сравнению с 24,51 мас.% CaCO_3). Они сильнее обогащены Fe_2O_3 , Na_2O , P_2O_5 , Zr. Плейстоцен Индийского океана обогащен K_2O , Co, Ni. Для всех литологических типов выявлено преобладание абсолютных масс всех химических компонентов в Атлантике. Обоснованы предположения о том, что полученные результаты объясняются большим отношением площади водосбора к площади бассейна аккумуляции и большей первичной продукцией в Атлантическом океане. Геохимическая специфика плейстоцена Индийского океана во многом объясняется спецификой состава глинистых минералов и большей площадью распространения пелагических глин.

Ключевые слова: Плейстоцен, донные осадки, Индийский океан, Атлантический океан, химический состав

Для цитирования: Левитан М.А. Первые результаты сравнительного анализа химического состава плейстоценовых отложений Индийского и Атлантического океанов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2024. № 3. С. 54–58.

FIRST RESULTS OF COMPARATIVE ANALYSIS OF PLEISTOCENE SEDIMENTS CHEMICAL COMPOSITION FROM THE INDIAN AND ATLANTIC OCEANS

Mikhail A. Levitan

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; m-levitan@mail.ru

Abstract. Geochemical peculiarities of Pleistocene sediments from the Indian and Atlantic oceans have been compared. We used 20000 determinations of elements for each ocean sediments to calculate their mean chemical composition. It was revealed that in average Atlantic sediments are more calcareous than Pleistocene sediments of the Indian Ocean (32.17 mass% CaCO_3 vs 24.51 mass% CaCO_3). They are enriched by Fe_2O_3 , Na_2O , P_2O_5 , Zr. The Pleistocene of the Indian Ocean is enriched by K_2O , Co, Ni. Mass accumulation rates of all chemical components for main lithological types dominate in the Atlantic. We proposed that these results are due to higher ratio of watershed area to accumulation basin area, and higher primary productivity in the Atlantic Ocean. Geochemical specifics of the Indian Ocean Pleistocene sediments can be explained by specifics of the clay minerals composition and larger area of pelagic clays distribution.

Keywords: Pleistocene, bottom sediments, Indian Ocean, Atlantic Ocean, chemical composition

For citation: Levitan M.A. First results of comparative analysis of Pleistocene sediments chemical composition from the Indian and Atlantic oceans. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 3: 54–58. (In Russ.).

Введение. А.Б. Ронов с коллегами внес существенный вклад в учение о химическом составе земной коры, указав на необходимость расчета средневзвешенного химического состава отложений изучаемого стратона в том или ином крупном регионе (на континентах, в океанах, глобально) [Ронов и др., 1990]. Такие данные и связанные с ними материалы по абсолютным массам химических компонентов необходимы, прежде всего, для сравнительного анализа геохимических особенностей внутри исследуемого стратона, например, между крупными океаническими бассейнами.

Международный проект глубоководного бурения, начавшийся в 1968 г. и продолжающийся в современный период времени, принес огромный массив данных по литологии и геохимии осадочного чехла океанов, в частности, по плейстоцену. В монографии [Левитан, 2021] на основе составленных обзорных литолого-фациальных карт и их обчета по объемному методу [Ронов, 1949] были рассчитаны средневзвешенные литологические составы плейстоценовых отложений (т.е., массы сухого осадочного вещества главных их типов) для всех основных океанических бассейнов.

Для получения их средневзвешенных химических составов необходимо определить средние арифметические химические составы для основных литологических градаций и затем умножить полученные результаты на массы сухого вещества этих же градаций. Абсолютные массы химических компонентов рассчитываются или по традиционным формулам [Лисицын, 1974], или с использованием уже имеющихся данных по абсолютным массам тех или иных типов плейстоценовых отложений [Левитан, 2021].

Целью работы является сравнение химического состава плейстоцена Индийского и Атлантического океанов. Для достижения указанной цели было необходимо решить задачи по определению среднего химического состава плейстоценовых отложений обоих океанов и по средним абсолютным массам для всех главных типов отложений. Заявленная цель может быть достигнута за счет деления соответствующих параметров для Атлантики на те же параметры для Индийского океана.

Фактический материал. В качестве фактического материала служили части отчетов по рейсам глубоководного бурения, содержавшие информацию о химическом составе плейстоценовых (в понимании [Gradstein, et al., 2004]) отложений Индийского и Атлантического океанов. Необходимо отметить, что Индийский океан был изучен без морей, принадлежащих его бассейну, а под Атлантическим океаном понимается акватория, простирающаяся от берегов Антарктиды на юге до пролива Фрама на севере. К указанной информации мы добавили сведения из других литературных источников. В этом плане особенно важно указать на работы [Лукашин, 1981; Мигдисов и др., 2001] по Индийскому океану и [Емельянов и др., 1975] по Атлантике. Все основные литературные источники указаны в статьях [Левитан и др., 2023, 2024]. Всего по Индийскому океану использовано около 2000 проб и 20000 элементоопределений, а по Атлантическому океану — более 2500 проб и примерно 20000 элементоопределений.

Полученные результаты. В итоге выполненных исследований удалось определить средние арифметические химические составы основных типов плейстоценовых отложений Индийского [Левитан и др., 2023] и Атлантического [Левитан и др., 2024] океанов. По указанной выше методике для них рассчитаны средневзвешенные химические составы. Суммирование масс химических компонентов позволило определить общие массы этих компонентов для плейстоцена Индийского и Атлантического океанов [Левитан, Сыромятников, 2023]. Вполне очевидно, что для сравнительного анализа плейстоценовых осадков обоих океанов требуется учесть их общие массы и таким образом рассчитать средние арифметические химические составы плейстоцена в этих океанах, что и явилось одной из основных задач настоящей статьи (табл. 1).

Таблица 1

Средние химические составы натуральных осадков ($C_{\text{нат}}$) и бескарбонатного вещества ($C_{\text{бкв}}$) плейстоцена Атлантического и Индийского океанов (оксиды петрогенных элементов даны в мас.%, редкие элементы — в мкг/кг)

Компонент	Атлантический океан		Индийский океан		$C_{\text{А.о.}}/C_{\text{И.о.}}$	
	$C_{\text{нат}}$	$C_{\text{бкв}}$	$C_{\text{нат}}$	$C_{\text{бкв}}$	$C_{\text{нат}}/C_{\text{нат}}$	$C_{\text{бкв}}/C_{\text{бкв}}$
SiO ₂	40,13	58,99	45,99	60,71	0,82	0,97
TiO ₂	0,53	0,78	0,62	0,82	0,85	0,95
Al ₂ O ₃	12,32	18,11	12,75	16,83	0,97	1,08
Fe ₂ O ₃	6,54	9,61	5,91	7,80	1,11	1,23
MnO	0,19	0,28	0,19	0,25	1,00	1,12
MgO	2,67	3,92	2,69	3,55	0,99	1,10
CaO	17,97	–	13,69	–	1,31	–
Na ₂ O	1,80	2,65	1,49	1,97	1,21	1,35
K ₂ O	1,94	2,85	2,38	3,14	0,82	0,91
P ₂ O ₅	0,30	0,44	0,24	0,32	1,25	1,38
V	83	122	84	111	0,99	1,10
Cr	74	109	91	120	0,81	0,91
Co	19	28	25	33	0,76	0,85
Ni	41	60	70	92	0,56	0,65
Zr	122	179	114	150	1,07	1,19

Примечание. $C_{\text{нат}}$ взяты из [Левитан и др., 2023, 2024].

Сравнение показало, что в принципе средние составы осадков обоих океанов достаточно близки, о чем свидетельствуют и расчеты отношений содержаний химических компонентов в плейстоцене Атлантики по отношению к плейстоцену Индийского океана (см. табл. 1). При этом отложения Атлантики более карбонатны (32,17 мас.% CaCO₃ по сравнению с 24,51 мас.% CaCO₃), сильнее обогащены Fe₂O₃, Na₂O и P₂O₅, а также Zr. Плейстоцен Индийского океана, напротив, отличается некоторой обогащенностью SiO₂, TiO₂, K₂O; Co и, особенно, Ni. Для избавления от разбавляющего влияния CaCO₃ содержания всех химических компонентов были пересчитаны на бескарбонатное вещество (бкв) (табл. 1). Результаты расчета отношений химических компонентов в этом случае показали, что бескарбонатное вещество в обоих океанах довольно близко по содержаниям SiO₂, TiO₂, K₂O; V, Cr. Выяснилось, что бкв плейстоцена Атлантики отличается повышенным содержанием оксидов полуторных элементов, MnO, MgO, P₂O₅, V и Zr. Отложения плейстоцена Индийского океана относительно обогащены K₂O, Co, Ni.

Расчеты абсолютных масс оксидов петрогенных элементов для основных типов плейстоценовых отложений выявили тотальное превосходство осадков Атлантического океана над отложениями Индийского океана (табл. 2). В большинстве случаев соответствующие отношения составляют несколько

Таблица 2

Таблица 3

Отношения абсолютных масс химических компонентов в плейстоценовых отложениях Атлантического океана по сравнению с Индийским

Компонент	Типы отложений					
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	2,44	4,45	2,43	2,07	4,33	2,63
TiO ₂	2,50	3,50	2,67	2,00	3,00	2,00
Al ₂ O ₃	3,33	4,43	7,51	3,73	2,50	13,50
Fe ₂ O ₃	4,50	5,29	2,19	3,40	3,50	7,00
MnO	1,67	2,50	2,22	4,00	5,00	2,50
MgO	4,00	4,50	2,11	4,00	3,00	12,00
CaO	8,00	6,18	1,46	3,00	3,81	20,00
Na ₂ O	2,86	7,00	2,69	2,50	10,00	8,00
K ₂ O	4,00	4,00	1,88	2,00	2,50	5,00
P ₂ O ₅	5,00	7,50	2,31	2,00	1,67	15,00

Примечание. Типы отложений: 1 — пелагические глины, 2 — гемипелагические глины, 3 — терригенные турбидиты, 4 — кокколитовые илы и глины, 5 — кокколитово-фораминиферовые илы и глины, 6 — диатомовые илы и глины.

единиц. Явные исключения найдены только для диатомовых илов и глин, где они особенно высоки для Al₂O₃, MgO, CaO, P₂O₅. Ситуация с диатомовыми отложениями объясняется спецификой химического состава осадков Бенгельского апвеллинга, которые составляют подавляющую часть образцов в нашей выборке по диатомовым осадкам Атлантики.

Обсуждение результатов. Для интерпретации приведенных в табл. 1 и 2 данных необходимы материалы по современной и плейстоценовой седиментации в обоих океанах (табл. 3). Плейстоценовые отложения Атлантического океана в среднем более карбонатны, чем одновозрастные осадки Индийского океана. Как известно, в четвертичное время подавляющая часть карбонатных осадков представлена биогенными отложениями. Для их образования требуются три основных фактора: поставка растворенных питательных веществ, кальция и гидрокарбонат-иона (в доминирующем количестве с континентов); образование скелетного CaCO₃ (роль первичной продукции) и накопление на дне выше уровня карбонатной компенсации в конкуренции с разбавляющими потоками литогенных веществ и биогенного опада. В табл. 3 параметр В/Л (отношение площади водосбора к площади бассейна аккумуляции) характеризует первый фактор, параметр современной первичной продукции — второй фактор. О третьем факторе дает представление последняя геоморфологическая карта дна Мирового океана [Harris, et al., 2014], на которой четко видно, что в Индийском океане доля глубоководных котловин в рельефе дна океана заметно выше, чем в Атлантике. При этом еще следует иметь в виду, что активность агрессивных к карбонатам придонных и глубинных вод в Атлантическом океане существенно выше,

Некоторые параметры современной и плейстоценовой седиментации в Атлантическом и Индийском океанах

Параметр	Атлантический океан	Индийский океан	Отношения параметров в Атлантическом и Индийском океанах
В/Л [Лисицын, 1974]	0,63	0,29	2,17
Современное накопление терригенного материала (млрд т/тыс. лет) [Лисицын, 1978]	642,49	303,78	2,11
Современное накопление карбонатного материала (млрд т/тыс. лет) [Лисицын, 1978]	543,39	231,30	2,35
Современное накопление SiO ₂ аморф. (млрд т/тыс. лет) [Лисицын, 1978]	45,11	62,90	0,72
Площадь развития современных пелагических глин (тыс. км ²) [Лисицын, 1978]	7284	13490	0,54
Современная первичная продукция (10 ⁹ т С/год) [Behrenfeld, Falkowski, 1997]	11,9	6,2	1,92
Абсолютные массы литогенного вещества в плейстоцене (г/см ² ×тыс. лет) [Левитан, 2021]	2,00	1,62	1,23
Абсолютные массы CaCO ₃ в плейстоцене (г/см ² ×тыс. лет) [Левитан, 2021]	1,01	0,49	2,06
Абсолютные массы биогенного опада в плейстоцене (г/см ² ×тыс. лет) [Левитан, 2021]	0,15	0,10	1,50

Примечание. В составленных А.П. Лисицыным [Лисицын, 1978] картах абсолютных масс терригенного вещества, CaCO₃ и SiO₂ аморф. Атлантический океан ограничен с севера широтой 60° с.ш.

чем в Индийском [Левитан, 2021]. Судя по данным табл. 3, такие же факторы, как и в современную эпоху, существовали и в плейстоцене.

Относительно терригенной седиментации важно отметить большую ее интенсивность в Атлантике, что доказывается параметрами В/Л, современного накопления терригенного материала, абсолютными массами литогенного материала в плейстоцене (см. табл. 3). В современную эпоху взвешенный сток с континентов в Атлантический океан с Южной Америки составляет 63,13% от общего объема, с Северной Америки — 25,49%, с Африки — 10,64% и с Европы — только 0,74% [Тримонис, 1995]. В Южной Америке важнейшую роль в рассматриваемом плане играет гидрологическая система Амазонки,

расположенная в зоне влажного гумидного климата, т.е. главной климатической зоне поставки терригенного материала [Лисицын, 1974]. Несмотря на развитие плейстоценового оледенения (например, в Мировом океане [Левитан, 2021]) и изменения интенсивности аридизации (например, в Северном полушарии [Eronen, et al., 2012]), климатические флуктуации не смогли принципиально изменить характер соотношения между терригенной седиментацией в Атлантическом и Индийском океанах.

Не менее важно отметить, что поставка терригенного материала в Атлантику в основном осуществляется реками, почти не связанными с областями максимальных неотектонических горообразовательных движений, в отличие от Индийского океана, где доминирующая доля терригенного вещества поступает из Гималаев.

Существенно, что отношение $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$, в значительной степени характеризующее отношение массы продуктов механического выветривания к массе продуктов химического выветривания, выше в плейстоцене Индийского океана, чем в плейстоцене Атлантики (2,46 против 2,13). Учет биогенного опала [Левитан, 2021] несколько уменьшает это различие.

Заметно большее отношение Na_2O к K_2O в плейстоценовых отложениях Атлантики, вероятнее всего, обусловлено более высоким содержанием иллита в Индийском океане [Тримонис, 1995; Chamley, et al., 1979; France-Lanord, et al., 2016], что связано с питающей провинцией Гималаев.

Отложения Атлантики отличаются от плейстоценовых осадков Индийского океана существенно более высокими содержаниями P_2O_5 (табл. 1). Это объясняется как общей более высокой первичной продукцией в Атлантике (табл. 3), так и вхождением большого числа анализов образцов осадков из Бенгальского апвеллинга в выборку по Атлантическому океану.

Серьезное обогащение плейстоцена Индийского океана Co и, особенно, Ni по сравнению с плейстоценом Атлантики (табл. 1) обусловлено почти вдвое большими площадями развития пелагических глин в этом океане (табл. 3).

Явное превосходство абсолютных масс оксидов петрогенных элементов во всех типах плейстоценовых отложений в Атлантике по сравнению с Индийским океаном (см. табл. 2) объясняется, прежде всего, заметно большим отношением площади водосбора к площади бассейна аккумуляции в Атлантике.

Заключение. В результате проведенного анализа установлено, что плейстоценовые отложения

Атлантического океана в среднем являются более карбонатными, чем плейстоцен Индийского океана (32,17 масс.% CaCO_3 по сравнению с 24,51 масс.% CaCO_3). Причинами этого различия являются большие величины В/Л, более высокая первичная продукция и меньшая роль глубоководных котловин в рельефе дна. При этом следует иметь в виду более сильное распространение в Атлантике агрессивных к карбонатам придонных и глубинных водных масс. В плейстоцене, как и в современную эпоху, интенсивность накопления биогенных карбонатов в Атлантическом океане была гораздо выше, чем в Индийском.

Среди литогенного вещества в плейстоцене обоих океанов явно преобладает терригенный материал, привносимый реками. Для Атлантики доминирующее значение в четвертичное время в этом плане имела Южная Америка, особенно бассейн Амазонки, находящийся в зоне влажного гумидного климата. В Индийском океане основным поставщиком терригенного вещества служили гидрологические системы Ганга-Брахмапутры и Инда, дренирующие Гималаи.

В терригенном материале плейстоцена Атлантики по сравнению с Индийским океаном установлена относительно более важная роль вещества, связанного с химическим выветриванием (судя по отношениям $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ и $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$). Скорее всего, свою роль при этом сыграла и очень слабая связь речных систем водосбора Атлантики с крупными поясами неотектонического горообразования, в отличие от северного водосбора Индийского океана. Заметное обогащение P_2O_5 плейстоцена Атлантики в целом связано с ее более высокой первичной продукцией и развитием апвеллингов вдоль западных берегов Африки.

Выявлена геохимическая специфика плейстоценовых отложений Индийского океана, заключающаяся в их обогащении Co и, особенно, Ni . Это явление обусловлено существенно большей площадью развития пелагических глин в данном океане, чем в Атлантике.

В плейстоцене, как и в современную эпоху, интенсивность накопления терригенного материала в Атлантическом океане была гораздо выше, чем в Индийском, что объясняется, прежде всего, более высоким отношением В/Л. При этом одним из наиболее эффективных механизмов в транзите терригенного вещества с континентов в океан в Атлантике служили гляциоэвстатические колебания уровня океана [Левитан, 2021], а в Индийском океане — неотектонические воздымания Гималаев.

Финансирование. Исследования выполнены за счет Госзадания ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Емельянов Е.М., Лисицын А.П., Ильин А.В. Типы донных осадков Атлантического океана. Результаты исследований по МГП. Океанологические исследования. Калининград, 1975. 579 с.

Левитан М.А. Плейстоценовые отложения Мирового океана. М.: РАН, 2021. 408 с.

Левитан М.А., Сыромятников К.В. Сравнительный анализ геохимических особенностей плейстоценовых

отложений Индийского и Атлантического океанов // Материалы XXV Международного совещания (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ИО РАН, 2023. С. 53–57.

Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г. и др. Химический состав плейстоценовых отложений Индийского океана // Литол. и полезн. ископ. 2023. № 5. С. 423–444.

Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В. Геохимические особенности плейстоценовых отложений Атлантического океана // Литол. и полезн. ископ. 2024. № 3. С. 323–344.

Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 439 с.

Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.

Лукашин В.Н. Геохимия микроэлементов в процессах осадкообразования в Индийском океане. М.: Наука, 1981. 184 с.

Мигдисов А.А., Бреданова Н.А., Гирин Ю.П., Щербаков В.С. Химический состав пелагических осадков экваториальной зоны восточной части Индийского океана — Важнейшие результаты Российско-Индийского сотрудничества в области океанографии по проекту «Трансиндоокеанский геотраверз» / Ред. В.С. Щербаков, В.Н. Живаго. М.: ГлавНИЦ, 2001. С. 203–269.

Ронов А.Б. История осадконакопления и колебательных движений Европейской части СССР (по данным

объемного метода) // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. Т. 3. 1949. 136 с.

Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 183 с.

Тримонис Э.С. Терригенная седиментация в Атлантическом океане. М.: Наука, 1995. 255 с.

Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // Limnol. and Oceanogr. 1997. Vol. 42. №1. P. 1–20.

Chamley H., Debrabant P., Foulon J., et al. Mineralogy and geochemistry of Cretaceous and Cenozoic Atlantic sediments off the Iberian Peninsula (site 398, DSDP leg 47B) // Init. Repts. DSDP, 47B, 1979. Washington (U.S. Govt. Printing Office), P. 429–449.

Eronen J.T. Fortelius M., Micheels A., et al. Neogene aridification of the Northern Hemisphere // Geology. 2012. Vol. 40. P. 823–826.

France-Lanord C., Spiess V., Klaus A., Schwenk T., and the Expedition 354 scientists. Bengal Fan // Proc. ODP 354: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). 2016.

Gradstein F.M., Ogg J.G., Smith A.G. A Geological Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. 599 p.

Harris P.T., Macmillan-Lawler M., Rupp J., Baker E.K. Geomorphology of the oceans // Mar. Geol. 2014. Vol. 352. P. 4–24.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024,
одобрена после рецензирования 21.03.2024,
принята к публикации 19.06.2024