

УДК 551.35:550.4:551.79

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ИНДИЙСКОГО И АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНОВ

© 2024 г. М. А. Левитан^{а,*}, Т. А. Антонова^а, Л. Г. Домарацкая^а,
А. В. Кольцова^а, К. В. Сыромятников^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

*e-mail: m-levitan@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2024 г.

После доработки 15.05.2024 г.

Принято к публикации 03.07.2024 г.

В настоящей статье на материале отчетов по рейсам Международного проекта глубоководного бурения (фазы DSDP, ODP, IODP) и других литературных данных для основных типов плейстоценовых отложений Индийского океана и Атлантики проводится сравнение среднего химического состава разных типов осадков, рассчитанного как среднее арифметическое из величин концентраций химических компонентов, и среднего состава осадков плейстоцена в целом для двух океанических бассейнов. Показано, что при сравнительном анализе средневзвешенного химического состава основную роль играют массы сухого осадочного вещества. Доминирование данных по Атлантике среди результатов расчета абсолютных масс химических компонентов объясняется существенно большей площадью водосбора по отношению к площади аккумуляции осадков, влиянием заметно более влажного климата и повышенной первичной продукцией в этом океане по сравнению с Индийским океаном.

Ключевые слова: Атлантический океан, Индийский океан, плейстоцен, донные отложения, геохимия
DOI: 10.31857/S0024497X24060017, **EDN:** WVQKER

В теоретической седиментологии важное значение имеет учение об осадочной (геохимической, фазовой) дифференциации, в котором рассматривается весь комплекс физических, химических и биологических факторов, воздействующих на различные компоненты осадочного вещества, поступающего в бассейн седиментации. Большое внимание уделяется тем трансформациям, которые происходят на пути от места поступления осадочного материала в бассейн до места его аккумуляции. Это учение разрабатывалось (и разрабатывается) седиментологами всего мира. Отдельно хочется отметить вклад отечественных ученых: Л.В. Пустовалова [1933], Н.М. Страхова [1956, 1963, 1976], А.П. Лисицына [1974, 1978, 1983], И.О. Мурдмаа [1987], Е.М. Емельянова [1998].

Наряду с учением об осадочной дифференциации, в последние десятилетия все большее внимание исследователей привлекает проблема

межбассейнового фракционирования, которая сфокусирована на литолого-геохимических различиях между крупными океаническими бассейнами и факторами, определяющими эти различия [Лисицын, 1974 и др.]. В частности, одному из аспектов этой проблемы – межбассейновым изменениям химического состава морской воды и форм элементов в водной толще – посвящен крупный международный проект “Geotracers” [Middag et al., 2015], продолжающийся и в настоящее время. В этом плане нельзя не отметить роль глобального конвейера термохалинной циркуляции (конвейера Лаппо-Брокера), который проходит через основные океанические бассейны с периодом от 1.5 до 4.0 тыс. лет [Broecker, 2010]. Одна из основных его функций – сглаживание межбассейнового фракционирования. Настоящая статья содержит материалы и выводы, относящиеся как к учению об осадочной дифференциации, так и к проблеме межбассейнового фракционирования.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Фактический материал нашего исследования представлен результатами анализа химического состава примерно 2000 проб плейстоцена Индийского океана и 3312 проб плейстоценовых отложений Атлантики (порядка 20000 элементо-определений для Индийского океана и 26107 – для Атлантического). Плейстоцен понимается нами в соответствии с представлениями в монографии [Gradstein et al., 2004]. Статья основана на обзорах геохимических особенностей плейстоценовых осадков обоих океанов [Левитан и др., 2023; Левитан и др., 2024]. В этих же статьях дан список использованных литературных источников по химическому составу рассматриваемых отложений, и достаточно подробно рассмотрены методы работы с данными анализов.

В настоящей статье основное внимание уделено сравнительной характеристике химических составов одинаковых типов плейстоценовых отложений в двух океанических бассейнах, которые рассчитывались как среднее арифметическое из величин концентраций химических компонентов, определенных в пробах отложений каждого типа.

Для сравнения использовались отношения средних содержаний химических компонентов в одинаковых типах осадков разных океанов ($K_{\text{ср Атл}} / K_{\text{ср Инд}}$), и отношение средних составов плейстоцена в целом в этих океанах [Левитан, 2024]. Заметно меньший акцент сделан на результатах сравнительного анализа средневзвешенных химических составов, а также абсолютных масс оксидов петрогенных элементов.

Для интерпретации полученных результатов мы использовали собственные расчеты площадей водосборов и распределения в их пределах различных климатических зон, а также областей гумидного климата, различающихся по количеству ежегодно выпадающих атмосферных осадков. Данные по абсолютным массам современного абиогенного вещества и CaCO_3 , первичной продукции, а также по плейстоценовым абсолютным массам тех же компонентов взяты из литературных источников, приведенных в статье [Левитан, 2024].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 приведены результаты расчета отношений средних содержаний химических компонентов в основных типах плейстоценовых отложений Атлантического океана и Индийского

океана. Редкоземельные элементы будут рассмотрены отдельно.

За небольшими исключениями, доминируют значения от 0.5 до 1.5. Можно предположить, что значения от 0.8 до 1.2 (первая группа) свидетельствуют о большом сходстве химического состава сравниваемых осадков. Величины выше 1.2 (вторая группа) указывают на обогащение плейстоценовых осадков Атлантики данными компонентами по сравнению с плейстоценом Индийского океана, а величины ниже 0.8 (третья группа) – на их обеднение.

Пелагические глины Атлантики примерно соответствуют по химическому составу пелагическим глинам Индийского океана по таким компонентам как SiO_2 , TiO_2 , MnO , MgO , Na_2O , V , Co , Zr . Обогащение наблюдается для следующих компонентов: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , P_2O_5 , Cr , Mo . Обеднены пелагические глины Атлантики Ni , Cu , Zn , Ba .

На различия в содержании CaO , связанного с биогенным карбонатом кальция, можно не обращать внимания. Представляет большой интерес обогащение атлантических пелагических глин Al_2O_3 . Недавние исследования показали, что в водной толще Атлантического океана, особенно в его северной половине, наблюдается заметное увеличение содержания, растворенного Al в направлении от поверхности к придонным водам [Menzel Barraqueta et al., 2020]. Весьма вероятно, что относительное обогащение пелагических глин Атлантики этим элементом обусловлено не только спецификой питающих провинций, но и дополнительной сорбцией Al из воды оседающими твердыми частичками осадочного вещества. В Индийском океане содержание растворенного Al в водной толще с глубиной практически не изменяется [Menzel Barraqueta et al., 2020].

В обоих океанах также наблюдается консервативное поведение растворенного Fe [Menzel Barraqueta et al., 2020]. Отсюда следует, что заметное обогащение пелагических глин Атлантики этим компонентом, скорее всего, обусловлено специфическим составом поступающего в бассейн аккумуляции осадочного материала.

Не исключено, что повышенные содержания в атлантических пелагических глинах таких компонентов, как P_2O_5 и Cr по сравнению с глинами Индийского океана, связаны с более заметной ролью вулканогенного материала в осадках Атлантики, хотя данные по содержанию TiO_2 несколько противоречат этому предположению.

Таблица 1. Отношение средних содержаний химических элементов в однотипных плейстоценовых осадках Атлантического и Индийского океанов ($K_{\text{ср. Атл.}} / K_{\text{ср. Инд.}}$)

| Компонент | Литогенные отложения | | | | Биогенные отложения | | | |
|--------------------------------|----------------------|------|------|------|---------------------|------|-------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| SiO ₂ | 0.89 | 1.00 | 1.12 | Н.о. | 0.83 | 1.07 | Н.о. | 0.74 |
| TiO ₂ | 1.05 | 0.70 | 1.19 | – | 0.65 | 0.91 | Н.о. | 0.62 |
| Al ₂ O ₃ | 1.34 | 1.00 | 0.97 | Н.о. | 1.17 | 0.67 | Н.о. | 3.03 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.74 | 1.17 | 1.00 | – | 1.12 | 1.04 | 133 | 1.43 |
| MnO | 0.86 | 0.67 | 1.3 | 0.16 | 1.57 | 1.63 | 16.67 | 0.55 |
| MgO | 1.12 | 0.97 | 0.98 | Н.о. | 1.43 | 0.66 | 0.24 | 3.13 |
| CaO | 3.42 | 1.35 | 0.67 | – | 0.94 | 1.01 | 0.92 | 5.85 |
| Na ₂ O | 1.18 | 1.51 | 1.20 | Н.о. | 0.72 | 2.06 | Н.о. | 1.97 |
| K ₂ O | 1.42 | 0.92 | 0.88 | Н.о. | 0.60 | 0.56 | Н.о. | 1.26 |
| P ₂ O ₅ | 1.33 | 1.67 | 1.13 | Н.о. | 0.78 | 0.52 | Н.о. | 3.82 |
| Li | – | – | – | Н.о. | 0.86 | 0.83 | Н.о. | Н.о. |
| Sc | Н.о. | – | – | Н.о. | 1.0 | 6.0 | Н.о. | Н.о. |
| V | 0.87 | 1.36 | 1.13 | Н.о. | 2.13 | 0.67 | – | 1.91 |
| Cr | 1.22 | 1.12 | 0.93 | 1.92 | 0.53 | 0.47 | Н.о. | 1.94 |
| Co | 0.9 | 1.00 | 0.78 | Н.о. | 0.76 | 1.67 | – | 0.81 |
| Ni | 0.33 | 0.84 | 0.85 | 4.29 | 0.51 | 0.66 | – | 2.26 |
| Cu | 0.32 | – | 0.91 | Н.о. | 1.31 | 0.19 | Н.о. | Н.о. |
| Zn | 0.63 | – | 0.64 | Н.о. | 0.84 | 0.58 | Н.о. | Н.о. |
| Rb | – | Н.о. | 0.05 | Н.о. | 2.28 | 0.27 | Н.о. | Н.о. |
| Ga | – | Н.о. | Н.о. | Н.о. | 1.5 | 2.27 | – | 6.69 |
| As | – | Н.о. | Н.о. | Н.о. | 3.17 | Н.о. | Н.о. | Н.о. |
| Sr | – | – | 0.78 | Н.о. | 0.11 | 0.6 | 0.29 | Н.о. |
| Ba | 0.43 | – | 1.01 | Н.о. | 0.15 | 1.0 | Н.о. | Н.о. |
| Ge | Н.о. | Н.о. | Н.о. | Н.о. | Н.о. | – | Н.о. | Н.о. |
| Pb | – | Н.о. | Н.о. | Н.о. | 1.22 | 1.15 | Н.о. | Н.о. |
| Mo | 2.0 | – | Н.о. | Н.о. | – | – | Н.о. | Н.о. |
| Y | Н.о. | 0.82 | 1.14 | Н.о. | Н.о. | Н.о. | Н.о. | 0.81 |
| Zr | 0.88 | 1.18 | 1.72 | Н.о. | Н.о. | Н.о. | Н.о. | 1.63 |
| Cs | – | Н.о. | Н.о. | Н.о. | Н.о. | 0.87 | Н.о. | Н.о. |
| Th | – | Н.о. | Н.о. | Н.о. | 2.29 | 1.18 | Н.о. | Н.о. |
| U | – | Н.о. | Н.о. | Н.о. | Н.о. | 0.12 | Н.о. | Н.о. |

Примечания. Среднее содержание рассчитано как среднеарифметическое концентраций элементов, определенных в осадках одного и того же типа. 1–8 – типы отложений: 1 – пелагические глины, 2 – гемипелагические глины, 3 – терригенные турбидиты, 4 – морские пески, 5 – кокколитовые глины и илы, 6 – кокколитово-фораминиферовые глины и илы, 7 – бентогенные и карбонатно-обломочные отложения, 8 – диатомовые глины и илы. Н.о. – не определялось; прочерк – менее 7 анализов.

Обогащение пелагических глин Индийского океана Ni, Cu и, в меньшей степени, Zn, скорее всего, связано с повышенным содержанием Mn, оксигидроксиды которого активно сорбируют эти элементы из морской воды, особенно Ni и Cu. Довольно высокое содержание Ba обусловлено тем, что среди рассматриваемых пелагических глин существенную роль играют миопелагические глины с примесью радиолярий [Мигдисов и др., 2001], которые накапливались на дне под зоной

высокой первичной продукции с активным продуцированием биогенного Ba.

Данные по РЗЭ для Атлантики взяты из работы [Левитан и др., 2024], а для Индийского океана – из статьи [Мигдисов и др., 2001], при этом в последней работе приведены данные только по 8 элементам: La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu (94 пробы). При сравнении отношения средних содержаний некоторых РЗЭ в плейстоценовых

пелагических глинах Атлантического и Индийского океанов, выясняется, что La, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu относятся к третьей группе (с величинами отношения <0.8), и только Ce – к первой (от 0.8 до 1.2). Таким образом, в пелагических глинах Индийского океана содержания большинства исследованных РЗЭ более высокие, чем в Атлантике. Можно предположить, что это связано со значительным количеством костных остатков рыб в пелагических глинах Индийского океана [Мигдисов и др., 2001]. С другой стороны, вполне вероятно, что особенностью петрофонда Индийского океана в целом является более высокое содержание РЗЭ. Нормированные по PAAS (постархейский австралийский глинистый сланец [Taylor, McLennan, 1985]) средние составы РЗЭ пелагических глин обоих океанов показаны на рис. 1. Здесь видно, что и те, и другие довольно близки к PAAS, однако глины Индийского океана сильнее обогащены РЗЭ, чем в Атлантике. В глинах Атлантического океана довольно отчетливо выражена положительная Ce-аномалия, однако для суждения об этой тенденции в плейстоценовых пелагических глинах Индийского океана не хватает данных. Ce-аномалия в осадках Атлантики свидетельствует о значительной роли в их составе

водородного вещества [Дубинин, Римская-Корсакова, 2011], что не удивительно, так как для пелагических глин характерно высокое содержание оксигидроксидов – Fe и, особенно, Mn

Для гемипелагических глин выделены те же три группы с разными величинами отношения среднего содержания химического компонента в осадках Атлантики и Индийского океана. В первую группу (величины отношения от 0.8 до 1.2) входят: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, K₂O, Cr, Co, Ni, Y, Zr. Ко второй группе (>1.2) относятся: CaO, Na₂O, P₂O₅, V. В третьей группе (с величинами отношения <0.8) находятся TiO₂ и MnO.

Как уже отмечалось выше, содержание компонентов первой группы близкое в плейстоценовых гемипелагических осадках обоих океанов. Компоненты второй группы обогащают гемипелагические глины Атлантики в сравнении с такими же осадками Индийского океана. Относительное обогащение Na₂O гемипелагических глин Атлантики может быть связано как с меньшим количеством иллита среди глинистых минералов Атлантики [Тримонис, 1995; France-Lanord et al., 2016], так и с более заметной ролью плагиоклазов, по сравнению с калиевыми полевыми шпатами,

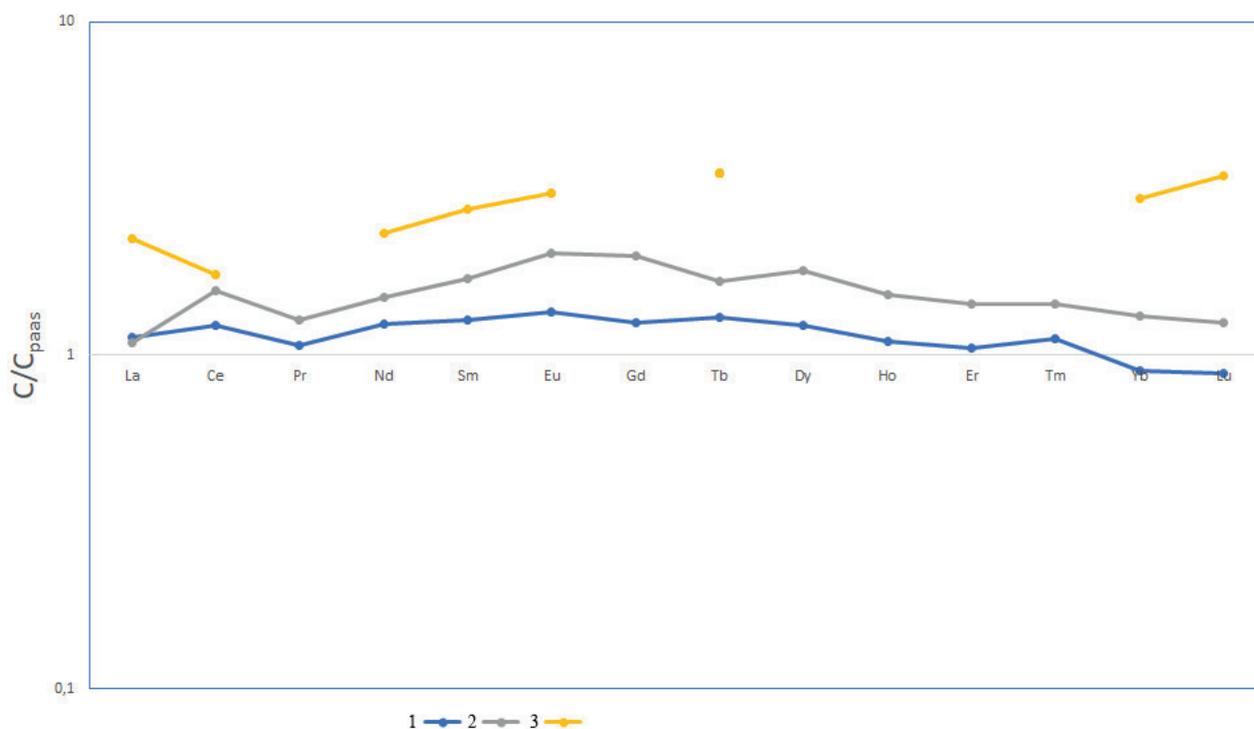


Рис. 1. Состав РЗЭ в глинистых отложениях плейстоцена Индийского и Атлантического океанов, нормированные на состав РЗЭ в PAAS.

1 – гемипелагические глины Индийского океана; 2 – пелагические глины Атлантического океана; 3 – пелагические глины Индийского океана.

в петрофонде питающих провинций Атлантики. Более высокие содержания таких компонентов, как P_2O_5 и V, установленные в гемипелагических глинах плейстоцена Атлантики, обусловлены значительной представительностью образцов из региона Бенгальского апвеллинга, где осадки обогащены фосфатами и органическим веществом [Емельянов, Романкевич, 1979]. Компоненты третьей группы, с относительно пониженными содержаниями, по-видимому, отражают специфику химического состава терригенного материала питающих провинций Атлантики.

Данные о содержаниях РЗЭ в гемипелагических глинах плейстоцена Индийского океана (65 проб) взяты нами из статьи [Mascarenhas-Pereira et al., 2023], а в плейстоценовых глинах такого же типа Атлантического океана – из работы [Левитан и др., 2024]. Величины содержания РЗЭ в глинах Индийского океана (за исключением Yb и Lu) несколько выше (от 1.05 до 1.35), чем в PAAS. Для плейстоценовых гемипелагических глин Атлантики имеются данные только о содержании La, Ce и Nd, и рассчитанные средние содержания этих элементов ниже, чем в PAAS или в гемипелагических глинах плейстоцена Индийского океана (см. рис. 1).

Такие же три группы с разными величинами отношения среднего содержания химического компонента в осадках Атлантики и Индийского океана были выделены и для терригенных турбидитов. В первую группу компонентов с близким содержанием в подобных осадках двух океанов вошли: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, K_2O , P_2O_5 , V, Cr, Ni, Ba, Y. По распределению компонентов во второй и третьей группе видно, что плейстоценовые терригенные турбидиты Атлантики относительно обогащены MnO, Na_2O , Zr, но обеднены CaO, Zn, Rb, Sr.

Относительно обогащения Na_2O турбидитов Атлантики можно предположить, что в данном случае речь идет, также как и для гемипелагических глин, о большей роли в пробах осадков плагиоклазов по сравнению с калиевыми полевыми шпатами. Более высокое содержание Zr и относительно пониженный уровень содержаний Rb в терригенных турбидитах Атлантики могут быть объяснены более высокой долей зернистых (в частности, песчаных фракций) в их составе [Taylor, McLennan, 1985]. Обеднение Sr этих осадков в Атлантике, по сравнению с Индийским океаном, вероятно, обусловлено более низким содержанием в них CaO.

По содержанию компонентов в морских песках Индийского океана сравнительно мало данных, по [Левитан и др., 2023]. Однако их анализ позволяет утверждать, что в плейстоценовых песках Атлантического океана, по сравнению с Индийским, заметно более высокое содержание Cr и Ni, и более низкое – MnO.

Для кокколитовых илов и глин выделяются три группы химических компонентов: первая – с близкими содержаниями химических компонентов в плейстоцене обоих океанов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, Li, Sc, Zn); вторая – компоненты с более высоким содержанием в атлантических осадках данного типа (MnO, MgO, V, Cu, Rb, Ga, As, Pb, Th); третья – компоненты с пониженными содержаниями в плейстоцене Атлантики, по сравнению с осадками того же типа Индийского океана (TiO_2 , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , Cr, Co, Ni, Sr, Ba).

В целом можно утверждать, что химический состав кокколитовых илов и глин в обоих океанах достаточно близкий. Различия в степени обогащения или обеднения теми или иными компонентами во многом связаны с полифациальной природой этих отложений, т.к. они аккумулируются и в гемипелагической, и в миопелагической зонах океанов [Левитан, 2021]. Вторым важным фактором является различное содержание карбонатного материала и значительные его вариации, что приводит к значительному разбросу величин содержания остальных компонентов при аналитических определениях.

С некоторой степенью уверенности можно предположить, что результаты по компонентам третьей группы, таким как P_2O_5 , Ni, Ba объясняются их вовлеченностью в биогенные процессы в южно-тропической зоне повышенной первичной продукции в Индийском океане. Отчасти повышенные содержания P_2O_5 в плейстоцене Индийского океана могут быть обусловлены его нахождением в гидроксилapatите в костях рыб.

Кокколитово-фораминиферовые илы и глины плейстоцена Атлантического и Индийского океанов при сравнении характеризуются следующими группами по величине отношений химических компонентов: 1) группа с примерно одинаковыми содержаниями химических компонентов (SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO, Li, Ba, Pb, Cs, Th); 2) группа компонентов с повышенными содержаниями в плейстоцене Атлантики по сравнению с Индийским океаном (MnO, Na_2O , Sc, Co); 3) группа компонентов, содержания которых в плейстоцене Атлантики ниже, чем в Индийском океане (Al_2O_3 , MgO, K_2O , P_2O_5 , V, Cr, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, U).

Основные выводы, полученные при сравнении кокколитовых илов и глин в двух разных океанах, применимы и к кокколитово-фораминиферовым осадкам, а именно: 1) достаточно большое сходство химических составов этих осадков; 2) полифациальный характер отложений и значительные вариации содержания в них биогенного карбонатного вещества, затрудняющих интерпретацию вариаций многих химических компонентов; 3) более активное вовлечение ряда компонентов третьей группы в процессы биогенной седиментации в Индийском океане (P_2O_5 , V, Ni, Cu, Sr, U).

Данных о химическом составе бентогенных карбонатных и карбонатно-обломочных отложений Атлантического и Индийского океанов очень мало. По ним можно судить, что среднее содержание CaO в осадках этого типа практически одинаковое. Осадки Атлантического океана существенно обогащены Fe_2O_3 и MnO, а обеднены — MgO и Sr. Отметим, что, за исключением MgO, распределение величин отношений остальных химических компонентов по группам является очень близким во всех трех типах рассмотренных карбонатных отложений.

Наконец, рассмотрим данные о химическом составе диатомовых илов и глин. В них только отношения Co и Y близки к единице, свидетельствуя о достаточно близком уровне содержания этих элементов в химическом составе осадков данного типа в плейстоцене обоих океанов. В Атлантике наблюдается обогащение диатомовых илов и глин целым рядом химических компонентов: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, CaO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 , V, Cr, Ni, Ga, Zr, тогда как в плейстоцене Индийского океана эти осадки относительно обогащены SiO_2 , TiO_2 , MnO.

Наблюдаемая картина обусловлена, главным образом, доминированием различных типов кремневых осадков в плейстоценовых отложениях рассматриваемых океанов, так в выборке проанализированных осадков плейстоцена Атлантического океана заметно преобладают диатомовые глины района Бенгальского апвеллинга, а в Индийском океане — диатомовые илы и глины южного пояса кремненакопления [Левитан, 2021].

В целом можно сделать вывод о том, что сравнительный анализ среднего химического состава различных типов плейстоценовых отложений двух океанов имеет смысл проводить только для литогенных отложений, т.к. разброс содержания основных биогенных компонентов ($CaCO_3$ и биогенного опала) сильно затрудняет сравнение

состава осадков с биогенной составляющей. В то же время, наши расчеты среднего химического состава осадков плейстоцена методом определения средневзвешенных концентраций компонентов [Левитан, 2024] показали, что осадки Атлантики в целом более высококарбонатные (в 1.31 раза), по сравнению с их плейстоценовыми аналогами из Индийского океана.

Наиболее интересно отметить, что абсолютные массы всех компонентов химического состава разных типов плейстоценовых осадков существенно выше в Атлантическом океане. Вероятно, это объясняется более значительной величиной площади водосбора этого океана, отнесенной к общей площади бассейна аккумуляции осадков (V/L), а также более высокой первичной продукцией в Атлантике [Левитан, 2024].

Анализ соотношения TiO_2 и Zr в разных типах плейстоценовых осадков по методике [Bracciali et al., 2007] позволяет прийти к выводу о том, что среди пород питающих провинций обоих океанов в течение плейстоцена доминировали породы среднего состава (рис. 2).

При сравнении наиболее глубоководных осадков Атлантического океана с литологически близкими осадками, но накапливавшимися в менее глубоководных условиях (а именно — пелагических глин с гемипелагическими, кокколитовых глин и илов с кокколитово-фораминиферовыми) отчетливо выявляется обогащение более глубоководных осадков Al_2O_3 . В Индийском океане такое явление не наблюдается. Как отмечалось выше, скорее всего, это обусловлено особенностями распределения растворенного Al в водной толще двух океанов [Menzel Barraqueta et al., 2020].

Напомним, что средневзвешенное содержание какого-либо компонента в том или ином типе отложений определяется путем умножения величины среднего содержания, рассчитанной как среднеарифметическое его концентраций в разных пробах, на массу сухого вещества отложений данного типа. Значения рассчитанных нами отношений масс сухого вещества основных типов осадков в плейстоцене Атлантического океана к массам сухого вещества тех же осадков в плейстоцене Индийского океана следующие: для пелагических глин — 1.02, гемипелагических глин — 2.46, терригенных турбидитов — 0.63, морских песков — 3.22, кокколитовых илов и глин — 1.84, кокколитово-фораминиферовых илов и глин — 3.36, бентогенных карбонатных и карбонатно-обломочных отложений — 0.81, диатомовых илов и глин — 1.41.

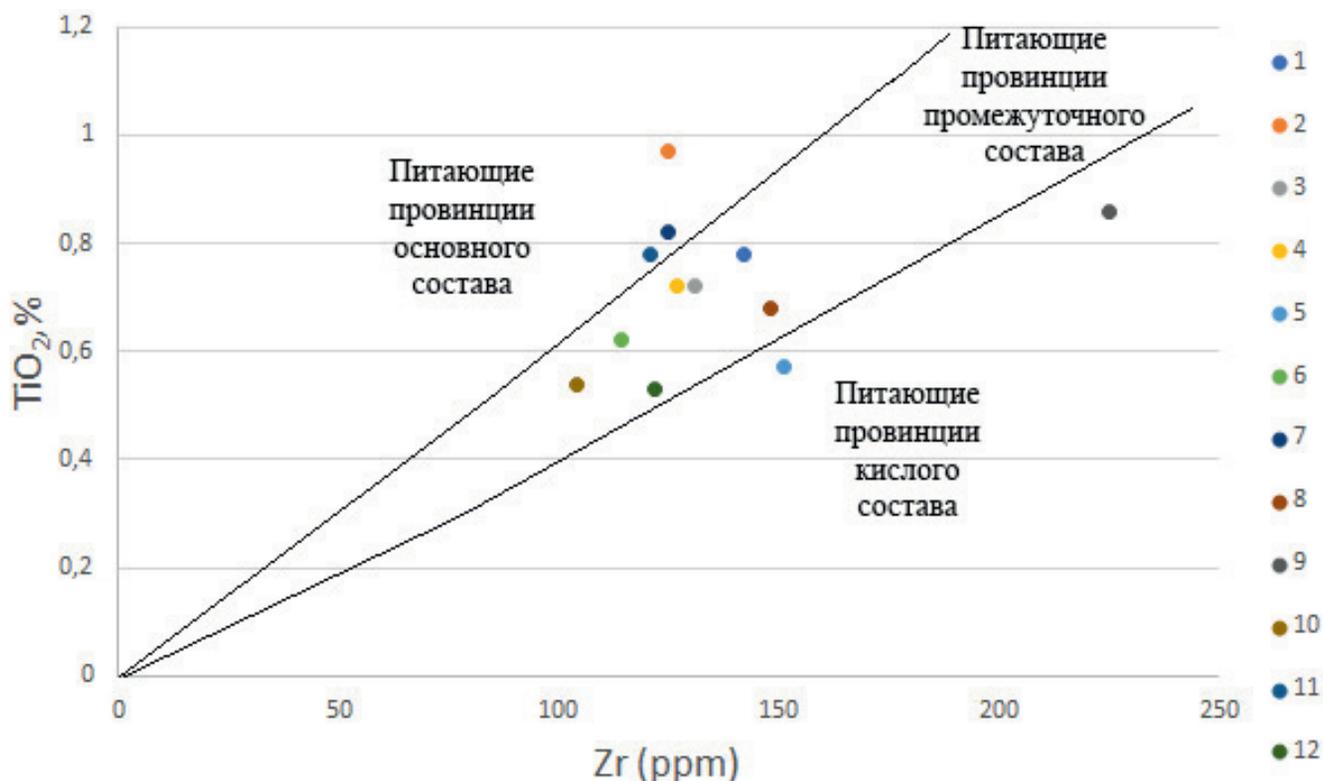


Рис. 2. Реконструкция петрофонада для разных типов осадков Индийского и Атлантического океанов по величине отношения TiO_2/Zr [Bracciali et al., 2007].

1 – пелагические глины Индийского океана; 2 – гемипелагические глины Индийского океана; 3 – терригенные турбидиты Индийского океана; 4 – бескарбонатное вещество кокколитовых илов и глин Индийского океана; 5 – бескарбонатное вещество кокколито-фораминиферовых илов и глин Индийского океана; 6 – средняя составляющая плейстоцена Индийского океана; 7 – пелагические глины Атлантического океана; 8 – гемипелагические глины Атлантического океана; 9 – терригенные турбидиты Атлантического океана; 10 – бескарбонатное вещество кокколитовых илов и глин Атлантического океана; 11 – бескарбонатное вещество кокколито-фораминиферовых илов и глин Атлантического океана; 12 – средняя составляющая плейстоцена Атлантического океана.

Значения отношения средневзвешенных содержаний, например, оксидов петрогенных элементов в плейстоцене Атлантики к плейстоцену Индийского океана, показывают, что определяющую роль при их расчете играет соотношение масс сухого вещества. Для пелагических глин значение отношения средневзвешенных содержаний колеблется от 0.91 до 1.77, для гемипелагических глин – от 2.45 до 2.92, для терригенных турбидитов – от 0.61 до 0.75, для кокколитовых илов и глин – от 1.1 до 2.8, для кокколито-фораминиферовых илов и глин – от 1.7 до 6.9, для диатомовых илов и глин – от 0.9 до 8.2. Данные по вулканогенным отложениям и карбонатным турбидитам в Индийском океане отсутствуют. В свою очередь, в Атлантике не развиты диатомово-радиоляриевые илы и глины. Аналитические данные по бентогенным карбонатам и карбонатно-обломочным отложениям, а также по морским

пескам слишком скудны для сравнительного анализа средневзвешенных содержаний.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Н.М. Страхов [1945] указывал на важность сравнительно-литологического метода при изучении истории седиментации, учитывающего данные о современном осадконакоплении. В частности, существенное внимание он уделял отношению V/L .

Обсуждаемые в настоящей статье бассейны седиментации имеют следующие границы: в исследованную площадь дна Индийского океана не входят его моря, а закартированная площадь составляет 75.137 млн km^2 [Левитан, 2021]. Атлантический океан простирается от берегов Антарктиды до пролива Фрама, включает в себя Мексиканский залив, моря Карибское и Скоша, а его закартированная площадь дна 80.170 млн km^2 .

[Левитан, 2021]. Поскольку заркартированные площади составляют в обоих случаях несколько более 80% от общей площади дна данного океана, то очевидно, что эти величины меньше L , хотя и относительно близки к ним. Обозначим их как L_1 .

Результаты проведенных нами расчетов по водосборным (вместе с ледосборными) площадям для обоих океанов по данным [Физико-географический ..., 1964; Атлас..., 1984] представлены в табл. 2. Из этой таблицы следует, что для Индийского океана она составляет 30.325 млн км², а для Атлантического океана – 56.761 млн км². Разделив V на L_1 , получаем для Индийского океана величину 0.40, а для Атлантического – 0.71. Таким образом, величина V/L_1 для Атлантики в 1.77 раз больше, чем для Индийского океана.

Для водосборов и ледосборов Индийского океана относительная роль различных климатических зон выглядит следующим образом (в %): аридная – 21.93, ледовая – 23.66, гумидная – 54.41. В случае Атлантического океана этот ряд выглядит так: аридная – 19.84, ледовая – 4.56, гумидная – 75.60. Следовательно, отношение общей площади с гумидным климатом на водосборах Атлантики к такой же площади на водосборах Индийского океана равно 1.39. Отметим, что на водосборах обоих океанов в ледовых и аридных зонах ежегодно выпадает менее 250 мм атмосферных осадков.

При этом особенное внимание на себя обращает обширная область с ежегодным выпадением более 2000 мм атмосферных осадков в Южной Америке, практически совпадающая с гидрологической сетью р. Амазонки (6.532 млн км²). Это – зона наиболее интенсивной поставки терригенного материала в бассейн Атлантики, а второй по значению зоной является гидрологическая сеть р.р. Миссисипи–Миссури [Страхов, 1960; Тримонис, 1995]. В Индийском океане главным поставщиком терригенного вещества является эрозия Гималаев, чьи продукты поступают через гидрологические сети р. Инд и р.р. Ганг–Брахмапутра [Свальнов, 1983]. Ранее Н.М. Страхов [1960] отметил, что составленная им карта современного смыва с континентов (т/км²) близко напоминает карту распространения климатических поясов с их различными среднегодовыми температурами и среднегодовым количеством осадков.

Нельзя не отметить, что основные области поставки терригенного материала в бассейн Атлантики практически не связаны с областями активного неотектонического горообразования, а на водосборах Индийского океана – напротив, Гималаи являются частью одного из самых активных неотектонических поясов Земли.

Судя по картам современных абсолютных масс абиогенного материала и $CaCO_3$ в Индийском и Атлантическом океанах (в Атлантике северная граница карт ограничена 60° с.ш.), отношения абсолютных масс абиогенного материала равны 2.11,

Таблица 2. Площади климатических зон и областей с годовыми величинами атмосферных осадков (мм/год) на водосборах (млн км²)

| Океаны | Области суши | Климатические зоны | | | | |
|---------------|------------------|--------------------|---------|----------|----------|-------|
| | | Аридная | Ледовая | Гумидная | | |
| | | | | 250–500 | 500–2000 | >2000 |
| Атлантический | Гренландия | – | 1.830 | – | – | – |
| | Евразия | – | – | 0.048 | 1.351 | – |
| | Северная Америка | 0.049 | – | 2.132 | 7.318 | – |
| | Южная Америка | 1.253 | – | 0.929 | 8.797 | 6.532 |
| | Африка | 9.962 | – | 3.247 | 10.118 | 0.605 |
| | Антарктида | – | 2.590 | – | – | – |
| Индийский | Евразия | 3.959 | – | 1.461 | 3.412 | 0.969 |
| | Африка | 0.550 | – | 1.484 | 4.160 | – |
| | Австралия | 2.141 | – | 2.993 | 2.020 | – |
| | Антарктида | – | 7.176 | – | – | – |

Примечание. В аридных и ледовых зонах водосборов данных океанов ежегодное количество атмосферных осадков составляет менее 250 мм/год [Физико-географический..., 1964].

а отношения абсолютных масс CaCO_3 — 2.35 в пользу Атлантики [Лисицын, 1978]. Отношение средней современной первичной продукции в Атлантике к Индийскому океану равно 1.92 [Behrenfeld, Falkowski, 1997]. На этом основании можно сделать вывод о том, что наблюдаемые различия в современных потоках терригенного и карбонатного вещества, накапливающегося в осадках обоих океанов, обусловлены в большей степени различиями в величинах отношения V/L_1 , климата и первичной продукции. Нельзя не учитывать также и значительно меньшую долю глубоководных котловин в рельефе дна Атлантического океана [Harris et al., 2014], что ведет к лучшей сохранности карбонатов, оседающих на дно.

Для плейстоценового времени соответствующие отношения абсолютных масс в пользу Атлантики равны 1.23 (литогенный материал) и 2.06 (CaCO_3) [Левитан, 2021]. Ранее уже приходилось комментировать эти величины вероятным недоучетом поставки терригенного материала Амазонкой в начале плейстоцена и интенсивным растворением карбонатов Атлантики в неоплейстоцене [Левитан, 2021]. В целом, по-видимому, можно сделать заключение об относительно близком соотношении терригенной седиментации и карбонатонакопления в современную эпоху и в плейстоцене в обоих исследованных океанах, несмотря на известные климатические и палеоокеанологические изменения.

Приведенные в данной статье материалы свидетельствуют о большом сходстве среднего химического состава однотипных отложений обоих океанов, хотя среди литогенных осадков всегда наблюдаются как группы элементов, обогащающих эти осадки по сравнению с другим океаном, так и группы элементов с меньшими содержаниями. Приведенная выше интерпретация этих материалов учитывает различия в петрофонде водосборов, конкретных литолого-фациальных условиях накопления, гидрохимии водной толщи.

Нами показано, что для обоих океанов петрофонд водосборов имеет, главным образом, промежуточный состав. Для водосборов Атлантики есть основания считать более высокой долю продуктов химического выветривания, по сравнению с водосборами Индийского океана [Левитан, 2024]. Вполне возможно, что доля иллита в осадках плейстоцена Индийского океана выше, чем в плейстоценовых отложениях Атлантики. Вероятно, петрофонд Атлантического океана обеднен РЗЭ по сравнению с Индийским океаном.

Более высокие содержания РЗЭ в пелагических глинах обоих океанов, по сравнению с гемипелагическими глинами, во многом обусловлены процессами осадочной дифференциации. Вариации отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в абиогенных осадках плейстоцена Атлантики также убедительно демонстрируют проявления осадочной дифференциации [Левитан и др., 2024].

Пелагические глины Индийского океана накапливались в условиях большей первичной продукции, чем в Атлантическом океане. Заметное обогащение Ni плейстоценовых осадков Индийского океана, скорее всего, вызвано значительно большей площадью развития пелагических глин, чем в Атлантике (в 1.85 раза) [Лисицын, 1978].

Более высокое обогащение Al_2O_3 относительно глубоководных плейстоценовых осадков в Атлантическом океане, по сравнению с более мелководными осадками одного и того же типа [Левитан, 2024], вероятно, обусловлено повышенным содержанием растворенного Al в более глубоких водных массах, особенно на севере океана [Menzel Barraqueta et al., 2020].

Если говорить об усредняющем воздействии глобального конвейера термохалинной циркуляции, то, на наш взгляд, в наибольшей степени оно проявлено в южном поясе кремненакопления с сильным влиянием Циркумантарктического течения [Левитан, 2021].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фактический материал исследования представлен результатами анализа химического состава примерно 2000 проб плейстоцена Индийского океана и 3312 проб плейстоценовых отложений Атлантики (около 20000 элементо-определений для Индийского океана и 26107 — для Атлантического). Стратиграфический объем плейстоцена понимается нами в соответствии с представлениями в монографии [Gradstein et al., 2004]. Статья основана на обзорах геохимических особенностей плейстоценовых осадков обоих океанов [Левитан и др., 2023; Левитан и др., 2024].

В целом сухая масса осадочного материала плейстоценовых отложений в Атлантике равна $3659.3 \cdot 10^{18}$ г, а Индийского океана — $2177.0 \cdot 10^{18}$ г [Левитан, 2021]. Таким образом, отношение масс равно 1.68. В основном осадки представлены однотипными отложениями, но в Атлантике достаточно широко развиты также, например, контуриты, карбонатные турбидиты и вулканогенные

отложения, а в Индийском океане — радиоляриево-диатомовые илы и глины.

Критический анализ изученных выборок фактического материала показал высокое разнообразие химических составов для каждого из изученных типов отложений в пространственно-временном плане. Оно обусловлено как различиями фациального плана, так и особенностями возрастной эволюции седиментации [Левитан, 2021]. При этом, однако, большие массивы статистических данных способствуют выявлению некоторых достаточно общих геохимических закономерностей, характерных в целом для плейстоцена исследованных океанов. Отмечено большое сходство химических составов для однотипных плейстоценовых отложений.

Рассмотрение величин отношения средневзвешенных содержаний, например, для оксидов петрогенных элементов в плейстоцене Атлантического и Индийского океанов, показало, что определяющее значение при расчетах имеет соотношение масс сухого вещества в плейстоценовых осадках этих океанов.

Четко выраженное преимущество абсолютных масс оксидов петрогенных элементов в плейстоцене Атлантики над Индийским океаном обусловлено показанными в настоящей работе различиями в отношениях V/L_1 , гумидности климата, первичной продукции и, отчасти, в рельефе дна этих двух океанов.

При общем сходстве петрофонда обоих океанов существенно отметить более важную роль материала химического выветривания для Атлантики.

Наиболее ярко процессы осадочной дифференциации выражены величинами отношения SiO_2/Al_2O_3 в литогенных осадках Атлантики и спектрами РЗЭ в плейстоценовых отложениях обоих океанов. В распределении Al_2O_3 в отложениях Атлантического океана большую роль играет геохимическое поведение растворенного Al.

Усредняющее действие глобального конвейера термохалинной циркуляции лучше всего проявлено в южном поясе кремненакопления [Левитан, 2021]. В целом же представляется правильным говорить о различных уровнях взаимодействия осадочной дифференциации и межбассейнового фракционирования при формировании фациальной структуры плейстоценовых отложений в океанических бассейнах и различных их частях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием для Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас офицера. М.: Военно-топографическое управление, 1984. 396 с.

Дубинин А.В., Римская-Корсакова М.Н. Геохимия редкоземельных элементов в донных отложениях Бразильской котловины Атлантического океана // Литология и полез. ископаемые. 2011. № 1. С. 3–20.

Емельянов Е.М. Барьерные зоны в океане. Осадко- и рудообразование, геоэкология. Калининград: Янтарный сказ, 1998. 416 с.

Емельянов Е.М., Романкевич Е.А. Геохимия Атлантического океана. Органическое вещество и фосфор. М.: Наука, 1979. 220 с.

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

Левитан М.А. Первые результаты сравнительного анализа химического состава плейстоценовых отложений Индийского и Атлантического океанов // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2024. № 3. С. 54–58.

Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В., Сыромятников К.В. Химический состав плейстоценовых отложений Индийского океана // Литология и полез. ископаемые. 2023. № 5. С. 423–444.

Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В. Геохимические особенности плейстоценовых отложений Атлантического океана // Литология и полез. ископаемые. 2024. № 3. С. 279–300.

Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. Количественное распределение осадочного материала. М.: Наука, 1974. 438 с.

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

Лисицын А.П. Основные понятия биогеохимии океана // Биогеохимия океана / Под ред. А.С. Мониной, А.П. Лисицына. М.: Наука, 1983. С. 9–31.

Мигдисов А.А., Бреданова Н.А., Гири 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.

Мурдмаа И.О. Фации океанов. М.: Наука, 1987. 304 с.

- Пустовалов Л.В.* Геохимические фации и их значение в общей и прикладной геологии // Проблемы советской геологии. 1933. № 1. С. 6–28.
- Свальнов В.Н.* Четвертичное осадкообразование в восточной части Индийского океана. М.: Наука, 1983. 192 с.
- Страхов Н.М.* О сравнительно-литологическом направлении и его ближайших задачах // Бюлл. МОИП. Отд. геол. Нов. сер. 1945. Т. 20. № 3–4. С. 34–48.
- Страхов Н.М.* Типы осадочного процесса и формации осадочных пород // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1956. № 5. С. 3–21.
- Страхов Н.М.* Типы климатической зональности в послепротерозойской истории Земли и их значение для геологии // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1960. № 3. С. 3–25.
- Страхов Н.М.* Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 535 с.
- Страхов Н.М.* Проблемы геохимии современного океанского литогенеза // Труды ГИН АН СССР. Вып. 212. 1976. 299 с.
- Тримонис Э.С.* Терригенная седиментация в Атлантическом океане. М.: Наука, 1995. 255 с.
- Физико-географический атлас Мира. М.: АН СССР и ГУГК, 1964. 298 с.
- Behrenfeld M.J., Falkowski P.G.* Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // *Limnol. Oceanogr.* 1997. V. 42. № 1. P. 1–20.
- Bracciali L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S.* Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): From source areas to configuration of margins // *Geol. Soc. Amer. Spec. Papers.* 2007. V. 420. P. 73–93.
- Broecker W.S.* The Great Ocean Conveyor Discovering the Trigger for Abrupt Climate Change. Princeton: Princeton Univ. Press, 2010. 176 p.
- France-Lanord C., Spiess V., Klaus A., Schwenk T.* (and the Expedition 354 scientists). Bengal Fan // *Proc. IODP 354: College Station, TX (International Ocean Discovery Program).* 2016. <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.354.101.2016>
- 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. V. 352. P. 4–24.
- Mascarenhas-Pereira M.B.L., Nath B.N., Neetu S. et al.* Modern sedimentation in the eastern continental shelf of India: Assessing the provenance and sediment dispersal pattern // *Mar. Geol.* 2023. V. 464. 107126.
- Menzel Barraqueta J.-L., Samanta S., Achterberg E.P. et al.* Compilation of observational dissolved aluminum data with regional statistical data treatment // *Front. Mar. Sci.* 2020. V. 7. 468.
- Middag R., van Hulst M.M.P., Van Aken H.M. et al.* Dissolved aluminium in the ocean conveyor of the West Atlantic Ocean: Effects of the biological cycle, scavenging, sediment resuspension and hydrography // *Mar. Chem.* 2015. V. 177. Part I.P. 69–86.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The continental crust: Its composition and evolution. London: Blackwell Sci. Publ., 1985. 312 p.

COMPARATIVE ANALYSIS OF GEOCHEMICAL PECULIARITIES OF PLEISTOCENE SEDIMENTS FROM INDIAN AND ATLANTIC OCEANS

M. A. Levitan^{1,*}, T. A. Antonova¹, L. G. Domaratskaya¹, A. V. Koltsova¹, K. V. Syromyatnikov¹

¹*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS,
Kosygina str., 19, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: m-levitan@mail.ru

We have compared the arithmetic average chemical composition of main types of Pleistocene sediments in the Indian and Atlantic oceans, and average chemical composition of the Pleistocene in both oceans as well. As the base for comparison we have used data from International project of deep-sea drilling reports (phases DSDP, ODP, IODP) and other references. It was revealed that results of comparative analyses of meanweighted chemical composition have been determined by masses of dry sediment matter. Domination of Atlantic mass accumulation rates over the Indian Ocean ones was due to larger ratio of watershed areas to areas of basin accumulation, more significant role of humid climate and enhanced primary production.

Keywords: Atlantic Ocean, Indian Ocean, Pleistocene, bottom sediments, geochemistry