

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО И РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ РЯДА КОМПОНЕНТОВ ВЕРХНЕПЛИОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА

© 2021 г. К. В. Сыромятников^а, *, М. А. Левитан^а

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

*e-mail: sykirv@gmail.com

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 03.03.2020 г.

Принята к публикации 04.03.2020 г.

В результате применения методов дисперсионного и регрессионного анализов изучено распределение и взаимосвязь органического углерода, карбоната кальция, абиогенного вещества, биогенного кремнезема и глубины их накопления в верхнеплиоценовых осадках в пределах различных структурных зон Индийского океана. С использованием дисперсионного анализа обнаружено влияние особенностей различных фациальных обстановок на распределение компонентов осадков на количественном уровне. Впервые представлены линейные и нелинейные регрессионные модели взаимосвязей органического углерода, карбоната кальция, абиогенного вещества, кремнезема и глубины их накопления.

Ключевые слова: донные осадки, Индийский океан, верхний плиоцен, органический углерод, карбонат кальция, абиогенное вещество, дисперсионный анализ, регрессионный анализ

DOI: 10.31857/S0016752521020072

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых распространенных методов изучения донных осадков и водной взвеси современных морей и океанов является исследование их компонентного состава. При этом наиболее часто изучаются с помощью количественного анализа абиогенное (литогенное) вещество (AB), CaCO_3 , SiO_2 биог., $\text{C}_{\text{орг}}$. Полученные результаты выражаются как в виде массовых процентов, так и в виде так называемых абсолютных масс, выраженных в (г/см²) × тыс. лет. Традиционно указанные компоненты исследуются раздельно и в исследованиях освещаются их связи, например, с первичной продукцией, глубиной дна, потоками вещества на дно и т.д. (Лисицын, 1974, 1978; Левитан, 1992; van Andel et al., 1975; Farrell et al., 1995).

В то же время все сильнее ощущается необходимость комплексного анализа основных осадкообразующих компонентов, связанная с изучением их связей между собой и с основными фациальными факторами среды осадкообразования. В связи с развитием математического моделирования в последние годы стали появляться публикации по множественной корреляции результатов компонентного анализа (Costa et al., 2018).

В настоящей статье предпринята попытка применения дисперсионного и регрессионного анализов к данным компонентного анализа верхнеплиоценовых осадков из кернов глубоководного бурения (проект DSDP) в Индийском океане.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В рамках проекта DSDP в Индийском океане были проведены рейсы №№ 22–27 (von der Borch et al., 1974; Whitmarsh et al., 1974; Fisher et al., 1974; Simpson et al., 1974; Davies et al., 1974; Veevers et al., 1974). Данные по содержаниям и абсолютным массам вышеуказанных компонентов осадков позднелиоценового возраста (табл. 1) рассчитаны М.А. Левитаном (Левитан и др., 2018₁, 2018₂, 2018₃) по материалам описания и изучения кернов скважин, представленным в перечисленных выше отчетах по рейсам глубоководного бурения. В данном регионе (рис. 1, табл. 1) были изучены 18 морфологических структур дна Индийского океана по 26 скважинам глубоководного бурения.

Важно отметить, что CaCO_3 и $\text{C}_{\text{орг}}$ определялись непосредственно в рейсах на анализаторах углерода фирмы “LECO” и выражены в массовых процентах. Указанные содержания SiO_2 биог. в % рассчитывались по определениям площадей в

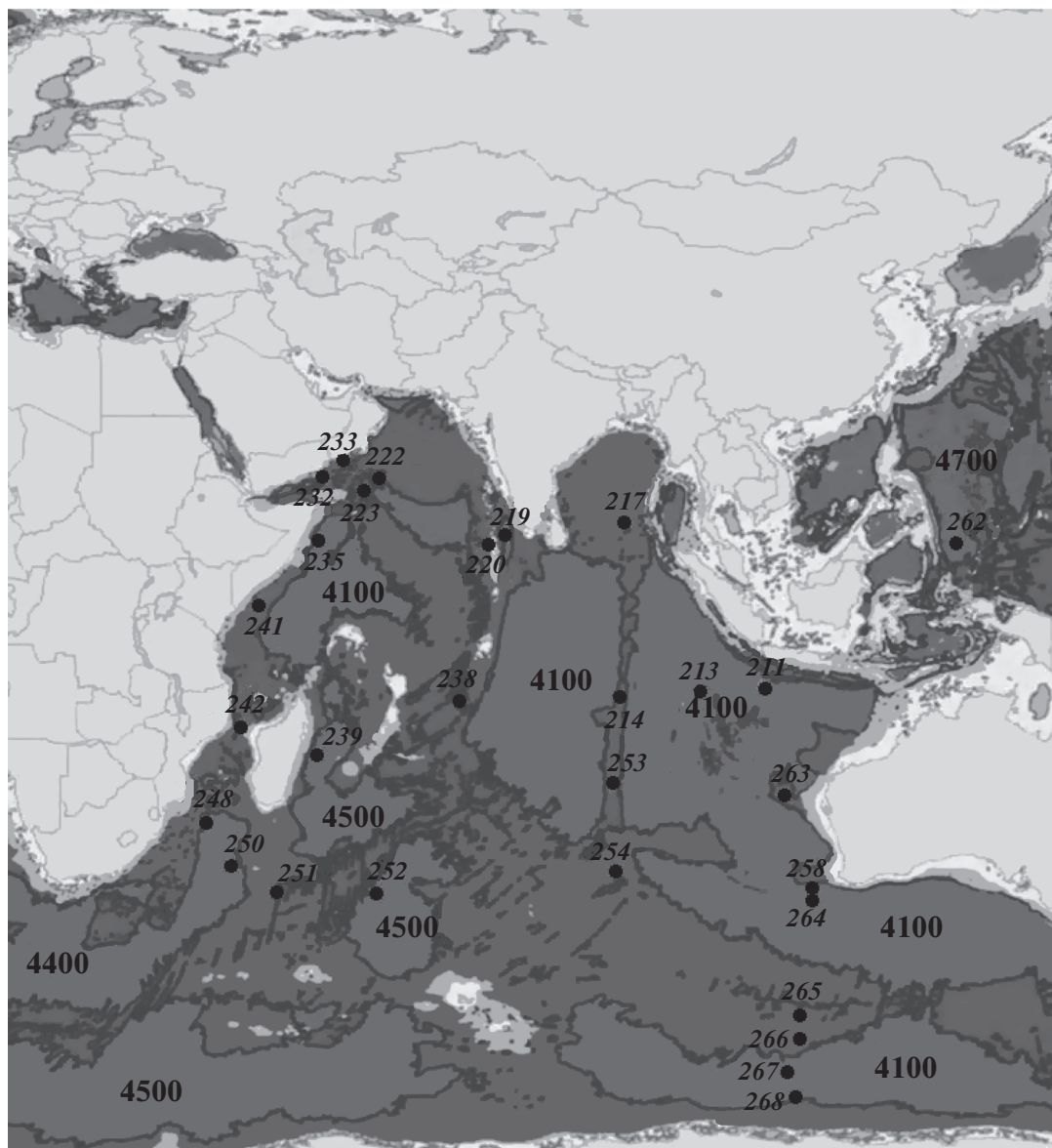


Рис. 1. Расположение скважин глубоководного бурения (проект DSDP) в Индийском океане. В качестве фона использован фрагмент карты расположения глубоководных котловин Мирового океана из статьи (Harris et al., 2014, с изменениями). Курсивом даны номера скважин, 4100–4700 — глубины глубоководных котловин (в м).

шлифах (мазках), занятых остатками кремневых организмов (в основном диатомей и радиолярий, в гораздо меньшей степени — силикофлагеллят и спикул кремневых губок). Специальные исследования показали, что начиная с 30% содержания SiO_2 биог., определенное под микроскопом, примерно на 20% выше истинного содержания этого компонента, выявленного химическим анализом (Uliana et al., 2001). Содержание абиогенного вещества равно разнице между 100% и суммой CaCO_3 , SiO_2 биог. и $\text{C}_{\text{орг}}$ в процентах. Указанные в табл. 1 содержания и абсолютные массы SiO_2 биог. в данной статье приводятся впервые.

Для расчета абсолютных масс использовались приведенные в отчетах материалы по стратиграфии, влажности и плотности натуральных осадков, скорости их седиментации.

Несмотря на плитно-тектонические движения, мы сочли возможным считать вероятные изменения палеокоординат и глубин дна скважин незначительными, поэтому в табл. 1 приведены современные координаты и глубины дна для пробуренных скважин.

Верхнеплиоценовые осадки, несомненно, подвержены влиянию диагенетических процессов, однако это влияние гораздо более слабое, чем

Таблица 1. Средние содержания (%) и абсолютные массы (АМ, г/см² тыс. лет) карбоната кальция (CaCO₃), биогенного кремнезема (SiO₂ биог.), абигенного вещества (АВ) и органического углерода (C_{орг}) в пределах различных структур Индийского океана в верхнеплиоценовых осадках

Структуры	Скважина, №	Координаты скважин широта/долгота	Тип структуры*	C _{орг} , %	C _{орг} , (АМ)	CaCO ₃ , %	CaCO ₃ , (АМ)	АВ, %	АВ, (АМ)	SiO ₂ биог., %	SiO ₂ биог. (АМ × 100)	Глубина, м
Котловина Уортон	211	09°46.53' Ю 102°41.95' В	1	0.2	0.00174	1	0.009	39	0.3391	60	52.14	5528
Восточно-Индийский хребет	217	08°55.57' С 90°32.33' В	2	0.2	0.00211	62	0.66	38	0.4013	0.01	0.01	3030
Чатос-Лаккадивский хребет	219	9°01.75' С 72°52.07' В	2	0.01	0.0001	63	0.69	37	0.4078	0.01	0.011	1764
Аравийская котловина	222	20°05.49' С 61°30.56' В	1	0.3	0.0872	14	4.07	86	25	0.01	0.29	3546
Континентальный склон океана Сомали	223	18°44.98' С 60°07.78' В	3	2.2	0.0268	21	0.26	72	0.8775	4.8	5.85	3633
Аденский залив	232	14°28.93' С 51°54.87' В	3	0.6	0.0376	22	1.38	76	3.7571	2	12.52	1743
Аденский залив	233	14°19.68' С 52°08.11' В	3	2.1	0.2578	43	5.28	49	6.0152	5.9	72.43	1839
Сомалийская котловина	235	03°14.06' С 52°41.64' В	1	0.5	0.0286	53	3.03	42	2.4033	5	28.61	5130
Центрально-Индийский хребет	238	11°09.21' Ю 70°31.56' В	2	0.1	0.0001	93	3.59	2	0.0773	5	19.32	2832
Маскаренская котловина	239	21°17.67' Ю 51°40.73' В	1	0.1	0.000441	12	0.05	88	0.3881	0.01	0.004	4971
Континентальный склон Сомали	241	02°22.24' Ю 44°40.77' В	3	0.3	0.00918	54	1.65	44	1.3464	2	6.12	4054
Хребет Деви	242	15°50.65' Ю 41°49.23' В	2	0.2	0.01389	55	3.82	45	3.1248	0.01	0.069	2275
Мозамбикская котловина	248	29°31.78' Ю 37°28.48' В	1	0.4	0.021427	19	1.02	81	4.339	0.01	0.054	4994
Мозамбикская котловина	250	33°27.74' Ю 39°22.15' В	1	0.5	0.01797	5	0.18	94	3.3791	1	3.594	5119

Таблица 1. Окончание

Структуры	Скважина, №	Координаты скважин широта/долгота	Тип структуры*	C _{орг} , %	C _{орг} (AM)	CaCO ₃ , %	CaCO ₃ (AM)	AB, %	AB (AM)	SiO ₂ биог., %	SiO ₂ биог. (AM × 100)	Глубина, м
Африканско-Антарктический хребет	251	36°30.26' Ю 49°29.08' В	2	0.4	0.02105	86	4.52	12	0.6314	2	10.51	3849
Котловина Крозе	252	37°02.44' Ю 59°14.33' В	1	0.2	0.00297	0.1	0.001	57	0.8464	42.9	42.9	5032
Восточно-Индийский хребет	253	24°52.65' Ю 87°21.97' В	2	0.01	0.0001	97	0.44	3	0.0127	0.01	0.005	1962
Восточно-Индийский хребет	254	30°58.15' Ю 87°53.72' В	2	0.1	0.000182	96	0.175	4	0.0073	0.01	0.002	1253
Плато Натуралиста	258	33°47.69' Ю 112°28.42' В	3	0.6	0.01356	86	1.9443	9	0.2035	5	11.3	2793
Тиморский глубоководный желоб	262	10°52.19' Ю 123°50.78' В	3	0.5	0.0209	72	3.51	27	1.1267	1	4.88	2298
Котловина Уортон	263	23°19.43' Ю 110°58.81' В	1	0.1	0.003	84	2.93	16	0.5572	0.01	0.04	5048
Плато Натуралиста	264	34°58.13' Ю 112°02.68' В	3	0.01	0.0001	100	0.64	0	0	0.01	0.006	2876
Юго-Восточный срединно-океанический хребет	265	53°32.45' Ю 109°56.74' В	2	0.01	0.0001	7	0.58	1	0.009	90	745.7	3581
Юго-Восточный срединно-океанический хребет	266	56°24.13' Ю 110°06.70' В	2	0.01	0.0001	1	0.04	9	0.09	90	360	4167
Австрало-Антарктическая котловина	267	59°15.74' Ю 104°29.30' В	1	0.01	0.0001	0	0	80	0.63	20	0	4522
Континентальное подножье	268	63°56.99' Ю 105°09.34' В	3	0.01	0.0001	0	0	97	1.15	3	0	3529

* Морфологические структуры дна Индийского океана обозначены цифрами: 1 – глубоководные котловины; 2 – подводные хребты и поднятия; 3 – континентальные окраины.

в более древних осадках (Левитан, 1992). Поэтому мы полагаем, что седиментационный сигнал в приведенных в табл. 1 величинах компонентов выражен существенно сильнее, чем диагенетический.

Еще одно важное обстоятельство связано не с количественными параметрами изученных компонентов, а с качественными. Дело в том, что ни один из рассматриваемых компонентов не является однородным. Так, в составе $C_{орг}$ есть углерод органического вещества как терригенного, так и планктоногенного происхождения. *A priori* понятно, что относительная роль терригенного органического вещества выше в отложениях Бенгальского и Индского фэнов (глубоководных конусов выноса великих индийских рек Ганг и Брахмапутра, и Инд), в зоне влияния р. Замбези и т.п. $CaCO_3$ в осадках представлен, главным образом, скелетными элементами планктонных организмов — фораминифер и кокколитофорид, однако в тропиках на относительно небольших глубинах встречаются остатки птеропод, на шельфах — многочисленные остатки моллюсков и иглокожих, на шельфе Омана — обломочные терригенные карбонаты. Про состав SiO_2 биог. уже сказано выше. Абиогенное вещество включает в свой состав терригенный осадочный материал, вулканогенно-обломочный и терригенно-вулканогенный, а также абиогенное вещество пелагических красных глин, представляющее собой нерастворимый остаток карбонатов с большой долей аутигенных минералов.

Примененные методы математической статистики были взяты из программы Statgraphics plus версия 5.0.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Треугольник абиогенное вещество, $CaCO_3$, SiO_2 биог. Все представленные в табл. 1 результаты (за исключением $C_{орг}$) показаны в процентах на треугольной диаграмме абиогенное вещество (AB), $CaCO_3$, SiO_2 биог. (рис. 2). Из анализа диаграммы вытекает вывод, что только компоненты осадков, накопившихся в позднем плиоцене на континентальных склонах Индийского океана, образуют единый кластер (обведенный сплошной линией). Компоненты осадков глубоководного ложа, т.е. глубоководных котловин и различных подводных хребтов и поднятий, тяготеют к двухкомпонентным смесям абиогенного вещества и $CaCO_3$, с одной стороны, и абиогенного вещества и биогенного кремнезема, с другой. Отсюда следует, что в фациальном отношении компоненты осадков глубоководного ложа резко дифференцированы на кремнисто-литогенную и карбонатно-литогенную группу. Вероятно, и в позднем плиоцене существовали отмеченные нами ранее для плей-

стоцена (Левитан, 2016) “два океана”: “ледовый” (т.е. индоокеанская часть Южного океана, в данном случае — с кремнисто-литогенной группой осадков) и “безледный” (относящийся к низким и средним широтам, с карбонатно-литогенной группой).

Результаты дисперсионного анализа. Цель дисперсионного анализа, как известно, исследование наличия или отсутствия существенного влияния какого-либо качественного или количественного фактора на изменения исследуемого результативного признака. Для этого фактор, предположительно имеющий или не имеющий существенного влияния, разделяют на классы градации (говоря иначе, группы) и выясняют, одинаково ли влияние фактора путем исследования значимости между средними в наборах данных, соответствующих градациям фактора.

В настоящей статье был применен однофакторный дисперсионный анализ, т.е. метод, который проверяет влияние на зависимую переменную одной независимой переменной.

Закономерность распределения биогенного и абиогенного вещества была более детально изучена по материалам данных однофакторного дисперсионного анализа для абиогенного вещества, карбоната кальция, биогенного кремнезема и органического углерода (рис. 3а). В результате с помощью дисперсионного метода была установлена зависимость распределения абиогенного и биогенного вещества от его фациальной принадлежности: абиогенного вещества с уровнем достоверности 95% (рис. 3б), карбоната кальция с уровнем достоверности 99% (рис. 3в), а также органического углерода на уровне 95% (рис. 3г).

Распределение абиогенного вещества происходило согласно законам механической дифференциации, т.е. согласно размеру обломочных частиц, а также определялось морфометрическими особенностями рассматриваемых структур дна Индийского океана (рис. 1, 3а, 3б). Как показали наши исследования, максимальные значения концентраций абиогенного вещества в осадках наблюдаются на континентальном склоне и в котловинах, что связано с максимальными скоростями осадконакопления на континентальных склонах, перекрытых терригенными осадками, и в тех частях глубоководных котловин, которые подверглись воздействию мутьевых потоков и подводных оползней с соседних континентальных склонов. Кроме того, в тех частях глубоководных котловин, где аккумулируются красные глины, высокие значения концентраций AB обусловлены отсутствием карбонатов вследствие их растворения. Минимальные значения содержания абиогенного вещества отмечаются на подводных поднятиях, где свою роль играет разбавление AB карбонатами.

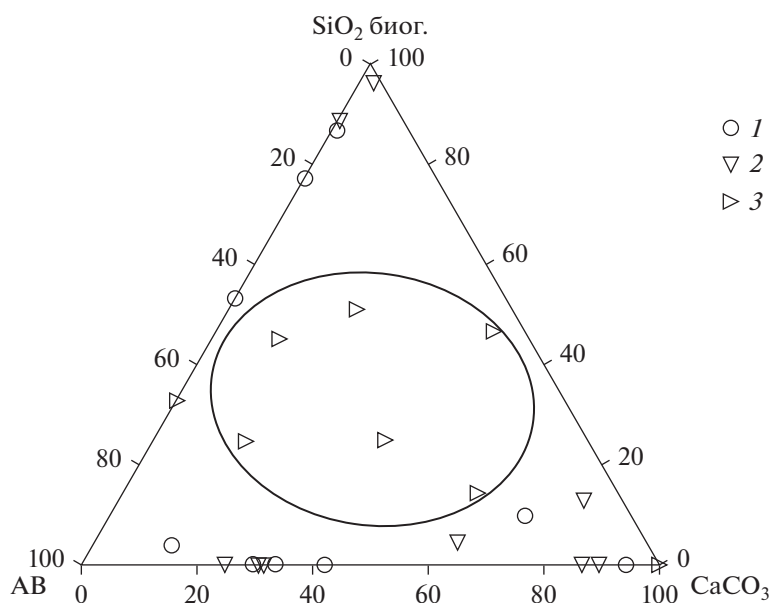


Рис. 2. Треугольная диаграмма содержаний CaCO_3 , SiO_2 биог. и абигенного вещества (AB) в верхнеплиоценовых осадках Индийского океана (в процентах). Условные обозначения: 1 — глубоководные котловины; 2 — подводные хребты и поднятия; 3 — континентальные окраины.

Анализ распределения карбоната кальция в осадках (рис. 3а, 3в) показывает, что высокие его значения связаны с подводными хребтами и континентальными склонами, а минимальные — с котловинами. Максимальные концентрации карбонатов на подводных хребтах и поднятиях определяются, главным образом, слабым влиянием разбавляющего AB, а также повышенной продукцией CaCO_3 и минимальным его растворением на малых глубинах. На континентальных окраинах важнейшую роль играет тип окраины (по преобладающим осадкам). Поэтому континентальные окраины Аравийского полуострова и Австралии (последние — вне нашего анализа) являются ареной аккумуляции карбонатов различного состава и здесь наблюдаются высокие концентрации CaCO_3 . Здесь же в связи с циркумконтинентальной зональностью распределения первичной продукции наблюдаются наиболее высокие значения продуктивности карбонатов. В глубоководных котловинах, находящихся ниже уровня (глубины) карбонатной компенсации (CCD), карбонаты растворены.

Распределение концентраций $\text{C}_{\text{орг}}$ в верхнеплиоценовых осадках (рис. 3а, 3г) свидетельствует о наиболее высоких значениях этого компонента на континентальных окраинах в связи с упоминавшейся циркумконтинентальной зональностью первичной продукции. Кроме того, массы тонкого осадочного материала, накапливающиеся в этой фациальной обстановке, служат сорбентом для органического вещества. С другой стороны, именно с помощью механизма “биоло-

гического насоса” через организмы планктона осуществляется (в значительной степени) в океане транспортировка AB на дно (Лисицын, 1978). В осадках глубоководного ложа концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ существенно ниже, чем на континентальных окраинах, как в силу уменьшения первичной продукции, так и из-за относительного увеличения размера зерен осадка на подводных хребтах в силу их большей подверженности воздействию придонных течений, которые вымывают тонкий осадочный материал, на котором преимущественно сорбируется $\text{C}_{\text{орг}}$.

Результаты регрессионного анализа. Регрессионный анализ весьма успешно применяется в океанологии для изучения зависимости распределения различных компонентов осадка в различных фациальных обстановках. Например, следует отметить работу, в которой было произведено картирование органического углерода в осадках различных фаций на основе данных регрессионной модели (Costa et al., 2018). Не менее интересна статья, где приведены результаты распределения органического вещества в поверхностных осадках залива Убатуба по результатам регрессионного анализа (Burone et al., 2003).

В целях анализа взаимосвязей карбоната кальция, органического углерода, абигенного вещества, биогенного кремнезема и глубины их накопления использовался одномерный регрессионный анализ. В процессе его проведения были изучены следующие парные взаимосвязи: 1) $\text{C}_{\text{орг}}$ и абигенного вещества (AB), их значения даны в

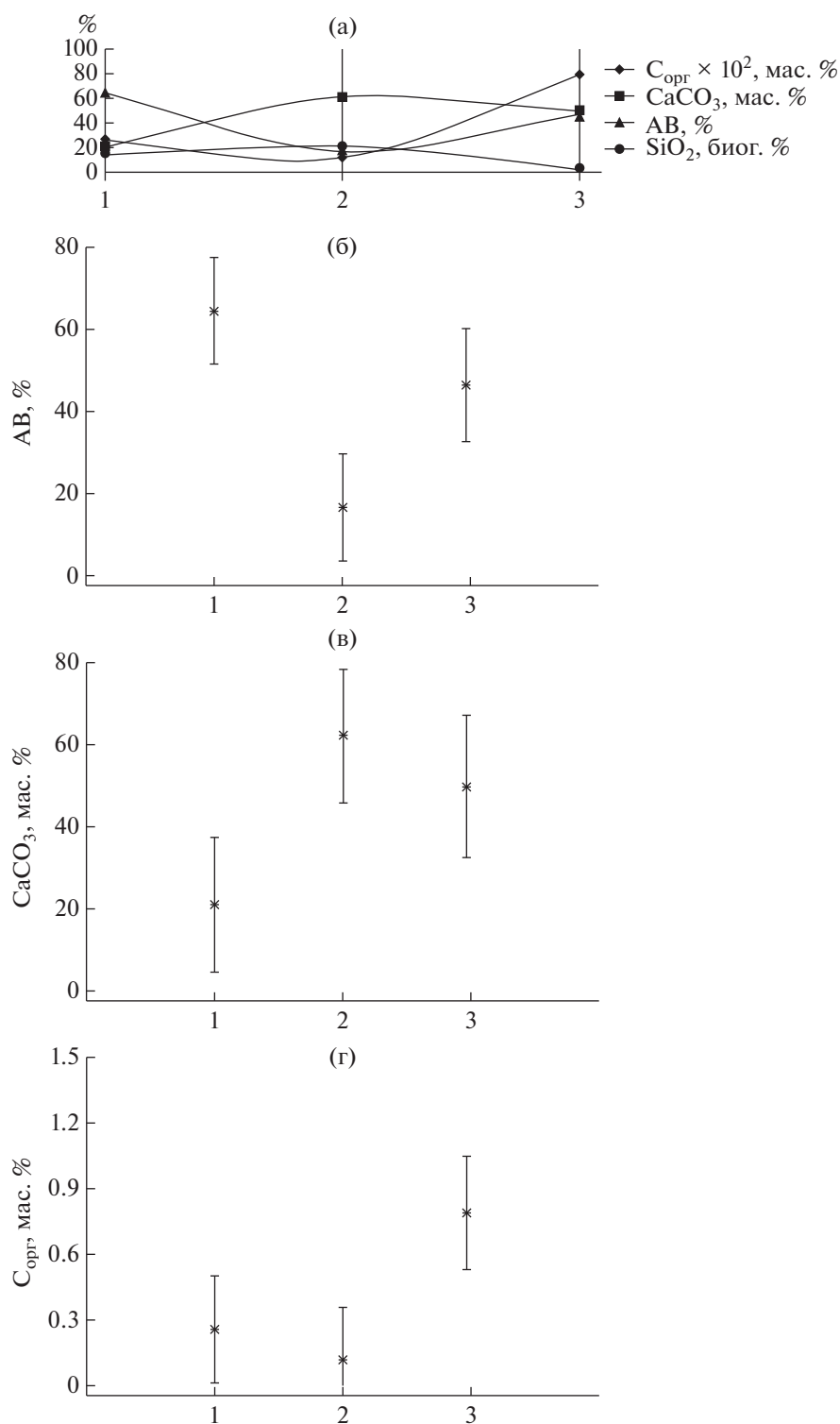


Рис. 3. Распределение средних содержаний основных компонентов осадков (в процентах) в главных фашиальных областях по данным дисперсионного анализа: а — сводный профиль; б — средние и 95% доверительные интервалы распределения AB; в — средние и 99% доверительные интервалы распределения CaCO_3 ; г — средние и 95% доверительные интервалы распределения $C_{\text{орг}}$. 1 — глубоководные котловины; 2 — подводные хребты и поднятия; 3 — континентальные окраины.

Таблица 2. Сводные данные полином регрессии взаимосвязи $C_{\text{орг}}$ и АВ

Независимые переменные	Коэффициенты уравнения регрессии	Значения случайной ошибки уравнения регрессии	t -критерии Стьюдента	P -value	
CONSTANT	−0.0102	1.0101	−0.014	0.321	
АВ	0.026	0.00594	4.31	0.0003	
АВ	−0.00086	0.000239	−3.60419	0.0015	
Дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Оценка дисперсии	Критерий Фишера	P -value
Дисперсия регрессии	0.0334667	2	0.0167	11.55	0.0003
Дисперсия остатка	0.0333153	23	0.00145		
Общая дисперсия	0.066782	25			
Коэффициент детерминации			50.11%		
Скорректированный коэффициент детерминации			45.78%		
Стандартная ошибка			0.038		
Среднее значение абсолютной ошибки			0.02		
Статистика Дурбина–Ватсона			2.12		

абсолютных массах (г/см^2) $\times$ тыс. лет; 2) $C_{\text{орг}}$ и CaCO_3 (значения даны в процентах); 3) CaCO_3 (в процентах) от глубины накопления; 4) CaCO_3 и АВ (в процентах); 5) SiO_2 биог. и CaCO_3 (в процентах).

Изучение первой пары — $C_{\text{орг}}$ и АВ (табл. 2) — методом полином регрессии позволило обнаружить статистически значимую связь между двумя переменными на уровне 99%, что подтверждено P -value меньше 0.01 (табл. 2). В данном случае, коэффициент детерминации (R^2) равен 50.11% и показывает долю изменения зависимой переменной $C_{\text{орг}}$ под влиянием независимой переменной АВ, объясняемую построенной моделью регрессии. Стандартная ошибка регрессии (среднеквадратическое отклонение регрессионных остатков) составляет 0.038. Данная величина представляет собой стандартное отклонение наблюдаемых значений $C_{\text{орг}}$ от предсказываемых значений $C_{\text{орг}}$. При этом уравнение полином регрессии для данной модели имеет следующий вид:

$$C_{\text{орг}} = -0.0102 + 0.026\text{АВ} - 0.00086\text{АВ}^2.$$

График соотношения абсолютных масс $C_{\text{орг}}$ и АВ (рис. 4а) свидетельствует о том, что при относительно низких (до 5–7 (г/см^2) тыс. лет) абсолютных массах АВ наблюдается прямо пропорциональная зависимость между обоими компонентами и это, скорее всего, является результатом сорбции растворенной органики на существенно пелитовом осадочном материале АВ. В то же время правая часть рисунка позволяет утверждать, что при сверхвысоких абсолютных массах АВ (свыше 15 (г/см^2) тыс. лет) существует преоблада-

ющая часть этого материала, которая не сорбирует растворенное ОВ, т. к. оно уже успело осесть на АВ, и поэтому разбавляет меньшую часть АВ, на которой сорбирован $C_{\text{орг}}$.

При исследовании с помощью полином регрессии соотношений процентных содержаний в осадках $C_{\text{орг}}$ и CaCO_3 (рис. 4б, табл. 3) была установлена статистически значимая связь между переменными с уровнем достоверности 95%, что подтверждает значение P -value менее 0.05. Коэффициент детерминации, равный 32%, говорит об изменении зависимой переменной $C_{\text{орг}}$ на эту величину под воздействием независимой переменной CaCO_3 . При этом стандартная ошибка составляет 0.5 (табл. 3). Уравнение полином регрессии подобранной модели имеет следующий вид:

$$C_{\text{орг}} = -0.015 + 0.0702\text{CaCO}_3 - 0.0015\text{CaCO}_3^2 + 0.0000084\text{CaCO}_3^3.$$

Показанный на рис. 4б график взаимосвязи процентных содержаний $C_{\text{орг}}$ и CaCO_3 в осадках верхнего плиоцена носит сложный характер: при низких значениях (до 30% CaCO_3) наблюдается тесная положительная корреляция, которую, вероятно, можно интерпретировать как результат одновременного накопления обоих компонентов на континентальных окраинах (см. рис. 3а). При содержании карбоната кальция от 30 до 80% корреляция с $C_{\text{орг}}$ явно отрицательная, что свидетельствует, возможно, о разбавлении органического вещества в условиях подводных хребтов и возвышенностей. Намечающаяся положительная корреляция при высоких (свыше 80% CaCO_3) содержаниях, как представляется, может быть объ-

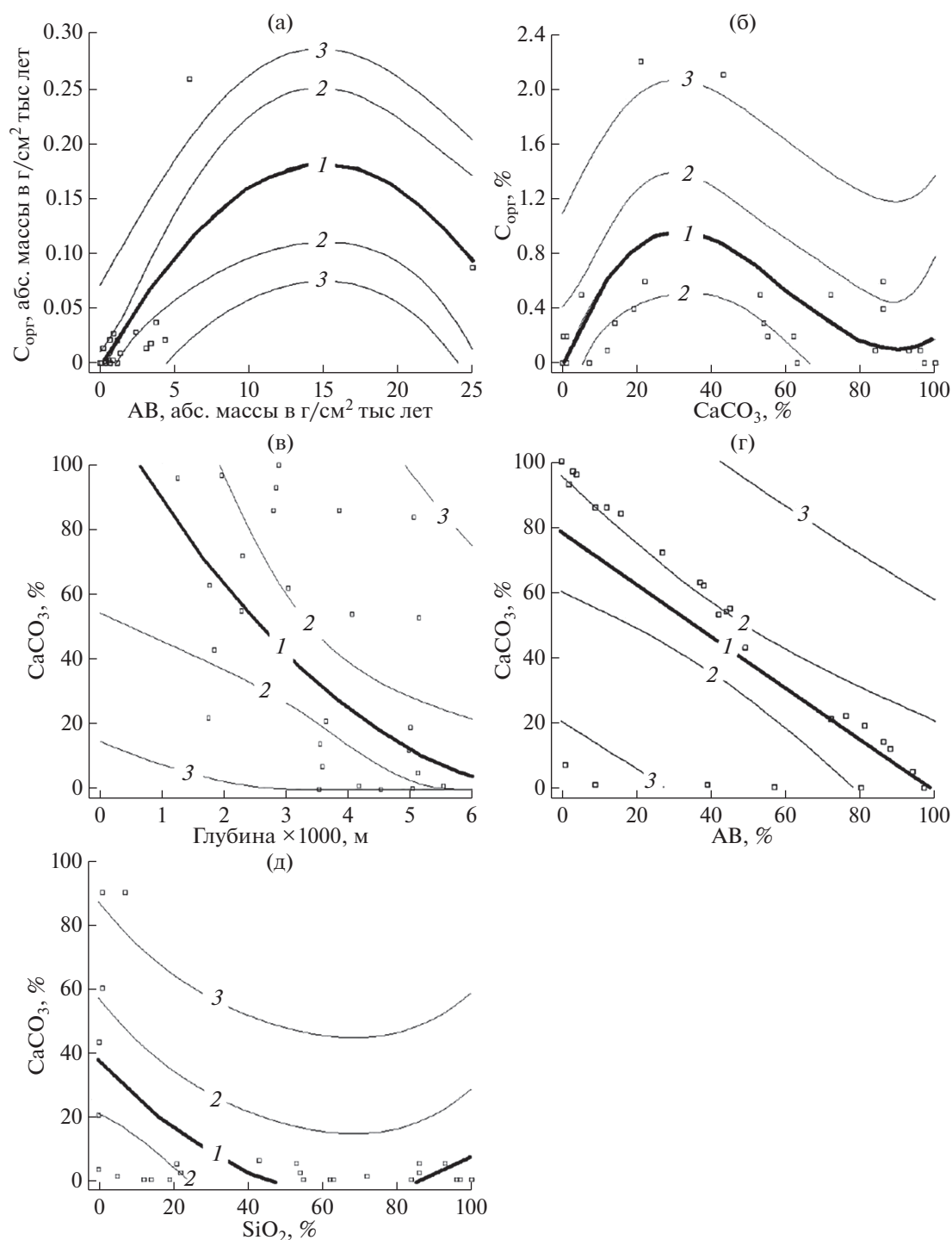


Рис. 4. Результаты регрессионного анализа: а – график полином регрессии соотношения абсолютных масс $C_{\text{орг}}$ и АВ (в $\text{г/см}^2 \times \text{тыс. лет}$); б – график полином регрессии соотношения $C_{\text{орг}}$ и CaCO_3 (в мас. %); в – график нелинейной обратной зависимости соотношения CaCO_3 (в мас. %) и глубин скважин (в м); г – график нелинейной обратной зависимости соотношения CaCO_3 (в мас. %) и АВ (в %); д – график нелинейной обратной зависимости соотношения CaCO_3 (в мас. %) и SiO_2 биог. (в %). 1 – линия регрессии; 2 – доверительный интервал для среднего значения предсказанных значений регрессии; 3 – доверительный интервал соответствующий предсказанному значению регрессии.

яснена содержащимся именно в кальцитовых раковинках специфическим органическим веществом при условии предельно низких концентраций других разновидностей органики (в том

числе за счет вымывания этой органики вместе с тонкими фракциями осадков в гребневых зонах хребтов и возвышенностей, табл. 1). Судя по последним данным, содержания $C_{\text{орг}}$ могут быть по-

Таблица 3. Сводные данные полином регрессии взаимосвязи $C_{\text{орг}}$ и CaCO_3

Независимые переменные	Коэффициенты уравнения регрессии	Значения случайной ошибки уравнения регрессии	<i>t</i> -критерии Стьюдента		<i>P</i> -value
CONSTANT	0.015	0.21	−0.07		0.94
CaCO ₃	0.0702	0.027	2.65		0.015
CaCO ₃ ²	−0.002	0.0007	−2.225		0.035
CaCO ₃ ³	−0.0000084	0.000005	1.85		0.08
Дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Оценка дисперсии	Критерий Фишера	<i>P</i> -value
Дисперсия регрессии	2.48	3	0.83	3.4	0.035
Дисперсия остатка	5.35	22	0.24		
Общая дисперсия	7.82	25			
Коэффициент детерминации			32%		
Скорректированный коэффициент детерминации			22.3%		
Стандартная ошибка			0.5		
Среднее значение абсолютной ошибки			0.3		
Статистика Дурбина—Ватсона			2.2		

нижены в осадках подводных хребтов также в связи с тем, что его активно поглощают бактерии, которые обитают в иловых водах (Sunita et al., 2018). В то же время, такие же соотношения наблюдаются и в других фациальных условиях – на континентальной окраине Аравийского полуострова (табл. 1). Здесь действуют другие механизмы: накопление карбонатных отложений в условиях практического отсутствия поставки терригенного вещества (за исключением эолового материала) и повышенные содержания $C_{\text{орг}}$ в осадках за счет апвеллинга (Левитан, 1992).

Рассмотрение регрессии следующей пары – CaCO_3 (%) и глубины накопления (м) – позволило обнаружить умеренно-сильную отрицательную корреляцию между двумя переменными (рис. 4в), в данном случае коэффициент корреляции составляет –0.6 (табл. 4). Поскольку значение P -value менее 0.01 и равно 0.004 (табл. 4), это подтверждает взаимосвязь CaCO_3 с глубиной на уровне статистической значимости 99%. Коэффициент детерминации в данной регрессионной модели составляет 30.3%. При этом стандартная ошибка равна 2.97. Наблюдается заметное уменьшение содержания карбоната кальция в осадках на глубинах с 4500 до 5000 метров (рис. 4в). Нелинейное уравнение регрессии CaCO_3 от глубины распределения имеет следующий вид:

$$\text{CaCO}_3 = (10.9406 - 0.0015D)^2,$$

где D – глубина $\times 1000$, м.

Полученные данные следует интерпретировать, прежде всего, с точки зрения растворения

CaCO_3 с глубиной, при этом отмеченное изменение в его содержании в интервале глубин 4500–5000 м явно связано с известным из литературы (Лисицын, 1978) ускорением растворения карбонатов при подходе к глубине карбонатной компенсации.

Исследование регрессии очередной пары – CaCO_3 и АВ (значения приведены в относительных процентах) – свидетельствует о наличии их взаимного разбавления, что доказано с уровнем значимости 99% (рис. 4г, табл. 5). При этом значения P -value составляют менее 0.01 (табл. 5). Коэффициент детерминации, который составляет 50.3%, показывает долю изменения зависимой переменной CaCO_3 под воздействием независимой переменной АВ. При этом стандартная ошибка регрессии составляет 2.91. Линейное уравнение регрессии зависимости переменной CaCO_3 от абигенного вещества (АВ) имеет следующий вид:

$$\text{CaCO}_3 = 77.8702 - 0.793\text{AB}.$$

В результате исследования последней пары – биогенного кремнезема (%) и CaCO_3 (%) – методом полином регрессии была обнаружена их статистическая взаимосвязь с уровнем значимости 99%, что подтверждает значение P -value, равное 0.007 (табл. 6). График зависимости двух переменных представлен на рис. 4д. Коэффициент детерминации составляет 35.3% (табл. 6), что объясняет долю изменения зависимой переменной – SiO_2 биог. – в результате изменения независимой переменной – CaCO_3 . Уравнение полином регрес-

Таблица 4. Сводные данные регрессионного анализа взаимосвязи CaCO_3 и глубины. Уравнение нелинейной регрессии: $Y = (a + bX)^2$

Параметры	Коэффициенты уравнения полином регрессии	Значения стандартных ошибок оценок коэффициентов	t -критерии Стьюдента		P -value
a	10.9406	1.73	6.32		0.00
b	−0.0015	0.0005	−3.23		0.004
Дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Оценка дисперсии	Критерий Фишера	P -value
Дисперсия регрессии	92.08	1	92.08	10.4	0.004
Дисперсия остатка	212.27	24	8.84		
Общая дисперсия	304.35	25			
Коэффициент корреляции			−0. 6		
Коэффициент детерминации			30.3		
Скорректированный коэффициент детерминации			27.4%		
Стандартная ошибка			2.97		
Среднее значение абсолютной ошибки			2.39		
Статистика Дурбина—Ватсона			1.26		

Таблица 5. Сводные данные регрессионного анализа взаимосвязи CaCO_3 и абиогенного вещества (АВ). Уравнение линейной регрессии: $Y = a + bX$

Параметры	Коэффициенты регрессии		Значения стандартных ошибок оценок коэффициентов		t -критерии Стьюдента	P -value
a	77.8702		8.6		9.05	0.000
b	−0.793		0.16		−4.93	0.000
Дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Оценка дисперсии		Критерий Фишера	P -value
Дисперсия регрессии	17048.6	1	17048.6		24.28	0.000
Дисперсия остатка	16850.4	24	702.1			
Общая дисперсия	33899	25				
Коэффициент корреляции			−0.71			
Коэффициент детерминации			50.3			
Скорректированный коэффициент детерминации			48.2%			
Стандартная ошибка			26.5			
Среднее значение абсолютной ошибки			17.98			
Статистика Дурбина—Ватсона			1.28			

сии зависимости SiO_2 биог. и CaCO_3 имеет следующий вид:

$$\text{SiO}_2\text{биог.} = 37.6361 - 1.261\text{CaCO}_3 + 0.0096\text{CaCO}_3^2.$$

Исследование рис. 4д показывает, что при содержаниях SiO_2 биог. от 0 до 60–70% наблюдается

отрицательная корреляция обеих переменных, а выше — положительная. Таким образом, в первом случае (в большинстве фациальных обстановок) оба компонента взаимно разбавляют друг друга, а во втором случае (на максимальных глубинах глубоководных котловин в Южном океане) усиленное растворение карбонатов элиминирует их разбавляющую для биогенного кремнезема роль.

Таблица 6. Сводные данные полином регрессии взаимосвязи SiO_2 биог. (%) и CaCO_3 (мас. %)

Независимые переменные	Коэффициенты уравнения регрессии		Значения случайной ошибки уравнения регрессии	<i>t</i> -критерии Стьюдента	<i>P</i> -value
CONSTANT	37.6361		8.26	4.56	0.0001
CaCO ₃	−1.261		0.49	−2.59	0.016
CaCO ₃ ²	0.0096		0.005	1.91	0.07
Дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Оценка дисперсии	Критерий Фишера	<i>P</i> -value
Дисперсия регрессии	6263.7	3	3131.9	6.3	0.007
Дисперсия остатка	11494.2	22	499.75		
Общая дисперсия	17757.9	25			
Коэффициент детерминации			35.3%		
Скорректированный коэффициент детерминации			29.6%		
Стандартная ошибка			22.4		
Среднее значение абсолютной ошибки			14.3		
Статистика Дурбина—Ватсона			1.3		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье с использованием методов множественной корреляции проанализированы соотношения содержаний основных компонентов верхнеплиоценовых осадков Индийского океана, вскрытых в 26 скважинах глубоководного бурения проекта DSDP, а именно, $\text{C}_{\text{орг}}$, CaCO_3 , абигенного вещества (AB) и SiO_2 биог.

Установлено, что соотношения главных компонентов (AB, CaCO_3 и SiO_2 биог.) разбиваются на три группы: первая из них образует ассоциацию из всех трех компонентов и приурочена к континентальным окраинам, формируя компактный кластер; вторая группа представляет собой двухкомпонентную смесь абигенного вещества и CaCO_3 , а третья — двухкомпонентную смесь абигенного вещества и биогенного кремнезема. Вторая и третья группы приурочены к глубоководному ложу: вторая — в средних и низких широтах, а третья — в индоокеанском секторе Южного океана.

В результате были получены данные, которые во многом совпадают с классическими представлениями о распределении абигенного и биогенного материала в океанических обстановках. При этом на основе проведения однофакторного дисперсионного анализа была обнаружена и доказана четкая закономерность распределения абигенного и биогенного материала осадков в зависимости от их фациальной принадлежности.

Применение одномерного регрессионного анализа (с приведением линейных и нелинейных регрессионных уравнений, рассматривающих взаимосвязь компонентов со статистической значимостью на уровне 95–99%) позволило достоверно

оценить данные компонентного анализа и выявить ранее неизвестные особенности, например, в распределении $\text{C}_{\text{орг}}$ в зависимости от абсолютных масс AB и процентных содержаний CaCO_3 , а также соотношений между процентными содержаниями CaCO_3 и SiO_2 биог.

Представляется, что полученные закономерности можно использовать при построении математических моделей позднеплиоценовой седиментации в Индийском океане.

Статья написана при финансовой помощи гранта РФФИ № 08-05-00221.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Левитан М.А. (2016) Сравнительный анализ пелагического плейстоценового кремнезема в Тихом и Индийском океанах. *Геохимия*. (3), 278–286.
- Levitan M.A. (2016) Comparative analysis of pelagic Pleistocene silica accumulation in the Pacific and Indian Oceans. *Geochem. Int.* **54**(3), 257–265.
- Левитан М.А., Антонова Т.А., Гельви Т.Н., Кольцова А.В., Домарацкая Л.Г. (2018₃) Фациальная структура и количественные параметры плейстоценовых отложений морей Китая. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. (76), 143–156.
- Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В., Сыромятников К.В. (2018₂) Фациальная структура и количественные параметры плейстоценовых отложений Японского моря. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. (76), 135–142.
- Левитан М.А., Балуховский А.Н., Антонова Т.А., Гельви Т.Н. (2013) Количественные параметры пелагической плейстоценовой седиментации в Тихом океане. *Геохимия*. (5), 387–395.

- Levitan M.A., Balukhovskiy A.N., Antonova T.A., Gelvi T.N. (2013) Quantitative parameters of Pleistocene pelagic sedimentation in the Pacific ocean. *Geochem. Int.* **51**(5), 345-352.
- Левитан М.А., Гельви Т.Н., Сыромятников К.В., Чекан К.М. (2018₁) Фациальная структура и количественные параметры плейстоценовых отложений Берингова моря. *Геохимия*. (4), 321-335.
- Levitan M.A., Gelvi T.N., Syromyatnikov K.V., Chekan K.D. (2018) Facies structure and quantitative parameters of Pleistocene sediments of the Bering Sea. *Geochem. Int.* **56**(4), 304-317.
- Маккой Ф.Х., Суинт Т.Р., Пайпер Д.Ц. (2003) Типы донных осадков / Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана (Гл. ред. Г.Б. Удинцев). М.—СПб. С. 114-115.
- Мурдмаа И.О. (1987) *Фации океанов*. М.: Наука. 304 с.
- Ронов А.Б. (1949) История осадконакопления и колебательных движений Европейской части СССР (по данным объемного метода). *Тр. Геофиз. Ин-та АН СССР*. (3), 136 с.
- Страхов Н.М. (1945) О сравнительно-литологическом направлении и его ближайших задачах. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. **20**(3/4), 34-48.
- Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. (2015) На пути к пост-плейт-тектонике. *Вестник Российской академии наук*. **85**(7), 60—615.
- Хаин В.Е. (2001) Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир. 606 с.
- Aubouin J., von Huene R. et al. (1982) *Init. Repts. DSDP*, 67: Washington (U.S. Govt. Printing Office).
- Berger W.H., Fisher K., Lai C., Wu G. (1987) *Ocean productivity and organic carbon flux. Part I. Overview and maps of primary production and export production*. Univ. of California, San Diego, SIO Reference 97-30.
- Clague J., Harper J.R., Hebda R.J., Howes D.E. (1982) Late Quaternary sea levels and crustal movements, coastal British Columbia. *Canadian J. Earth Sci.* **19**, 597-618.
- Davies E., Malone M. et al. (2010) *Proc. IODP, Init. Repts.* 328: Washington DC (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.).
- Gradstein F.M., Ogg J.G., Smith A.G. (2004) *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge Univ. Press, 82 p.
- Hamilton T.D. (1994) Late Cenozoic glaciation of Alaska. In: *The Geology of Alaska* (Eds G. Plafker, H.C. Berg). GSA, 813-844.
- Harris R.N., Sakaguchi A., Petronotis K. et al. (2013) *Proc. IODP, Init. Repts.* 344: College Station TX (Integrated Ocean Drilling Program).
- Jaeger V.M., Gulick S.P.S., LeVay L.G. et al. (2014) *Proc. IODP, Init. Repts.* 341: College Station TX (Integrated Ocean Drilling Program).
- Kulm L.D., von Huene R. et al. (1973) *Init. Repts. DSDP*, 18: Washington (U.S. Govt. Printing Office).
- Lopes C., Mix A.C., Abrantes F. (2010) Environmental controls of diatom species in the northeast Pacific. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **297**(1), 188-200.
- Lyle M., Koizumi I., Richter C. et al. (1997) *Proc. ODP, Init. Repts.*, 167: College Station, TX (*Ocean Drilling Program*).
- Moore J.C., Watkins J.S. et al. (1982) *Init. Repts. DSDP*, 66: Washington (U.S. Govt. Printing Office).
- Quaternary Glaciations — Extent and Chronology*. (2011) Vol. 15. Eds J. Ehlers, P.L. Gibbard, P.G. Hughes. Amsterdam: Elsevier, 1126 pp.
- Riedel M., Collett M., Malone M.J. et al. (2006) *Proc. IODP, Init. Repts.* 311: Washington DC (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.).
- Tréhu A.M., Bohrmann G., Rack F. et al. (2007) *Proc. ODP, Init. Repts.*, 204: College Station, TX (*Ocean Drilling Program*).
- Vannucchi P., Ujiie K., Malinverno A. et al. (2012) *Proc. IODP, Init. Repts.* 334: Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.).
- Von Huene R., Aubouin J. et al. (1985) *Init. Repts. DSDP*, 84: Washington (U.S. Govt. Printing Office).
- Westbrook G.K., Carson B., Musgrave R.J. et al. (1994) *Proc. ODP, Init. Repts.*, 146 (*Pt. 1*): College Station, TX (*Ocean Drilling Program*).
- Whitmarsh R.B., Beslier M.-O., Wallace P.J. et al. (1997) *Proc. ODP, Init. Repts.*, 173: College Station, TX (*Ocean Drilling Program*).
- www.gebco.org (2004)
- Yeats R.S., Haq B.U. et al. (1981) *Init. Repts. DSDP*, 63: Washington (U.S. Govt. Printing Office).