

УДК 550.8.01: 550.85

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-39-49

ДЕТАЛИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ ФАЦИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КУРИЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ И ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ОДНОМЕРНОГО РЕГРЕССИОННОГО И ОДНОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗОВ

Кирилл Владимирович Сыромятников¹, Михаил Аркадьевич Левитан²,
Руслан Рустемович Габдуллин³✉

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8798-4425>

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; m-levitan@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; gabdullin@geokhi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

Аннотация. На основе комплексного литолого-геохимического анализа осадков юга Охотского моря и северо-западной части Тихого океана впервые выполнено литолого-фациальное районирование региона. Выделены три фациальные области: Курильская котловина, Курило-Камчатский глубоководный желоб и Северо-Западная часть Тихого океана, каждая из которых подразделена на две подобласти с характерными морфологическими и седиментационными признаками. Установлены различия в источниках и составе терригенного и вулканотерригенного материала, степени первичной биологической продуктивности, а также роли гравитационных и гидродинамических процессов в формировании донных осадков. Однофакторный дисперсионный анализ и методы математической статистики позволили выявить устойчивые геохимические индикаторы (Si/Al, Fe, Ti, Th), разграничивающие литолого-фациальные зоны. Наиболее продуктивной по биогенному осадконакоплению и насыщенной терригенным материалом оказалась Курильская котловина, в то время как наибольшее влияние вулканизма зафиксировано в Курило-Камчатском желобе. Северо-западная часть Тихого океана характеризуется слабой поставкой осадочного материала и преобладанием пелагических и гемипелагических осадков.

Полученные результаты подтверждают значимость геолого-геохимического подхода и методов статистического анализа в фациальном районировании современных морских бассейнов.

Ключевые слова: органический углерод, распределение углерода, диагенез, донные осадки Охотского моря, донные осадки Тихого океана, современные осадки, корреляционный анализ Пирсона, регрессионный анализ, сила воздействия ветра, поверхностные температуры

Для цитирования: Сыромятников К.В., Левитан М.А., Габдуллин Р.Р. Детализация современной фациальной структуры Курильской котловины и западной части Тихого океана по данным одномерного регрессионного и однофакторного дисперсионного анализов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 5. С. 39–49.

DETAILED MODERN FACIES STRUCTURE OF KURIL BASIN AND WESTERN PACIFIC OCEAN ACCORDING TO UNIVARIATE REGRESSION AND ONE-FACTOR VARIANCE ANALYSES

Kirill V. Syromyatnikov¹, Michael A. Levitan², Ruslan R. Gabdullin³✉

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; sykirv@gmail.com

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; m-levitan@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; gabdullin@geokhi.ru✉

Abstract. Based on a comprehensive lithologic and geochemical analysis of sediments from the southern Sea of Okhotsk and the northwestern Pacific Ocean, the lithologic-facies zoning of the region was performed for the first time. Three facies areas were identified: the Kuril Basin, the Kuril-Kamchatka Deepwater Trough, and the Northwest Pacific Ocean, each of which is subdivided into two subareas with characteristic morphological and sedimentary features. Differences in the sources and composition of terrigenous and volcanic-terrigenous material, the degree of primary biological productivity, and the role of gravitational and hydrodynamic processes in the formation of bottom sediments were established. Single-factor dispersion analysis and mathematical statistics methods allowed us to identify stable geochemical indicators (Si/Al, Fe, Ti, Th) that distinguish lithologic-facial zones. The Kuril Basin turned out to be the most productive in terms of biogenic sedimentation and saturated with terrigenous material, while the greatest influence of volcanism was recorded in the Kuril-Kamchatka Trough. The Northwest Pacific Ocean is characterized by a weak supply of sedimentary material and the predominance of pelagic and hemipelagic sediments.

The results obtained confirm the significance of the geological and geochemical approach and methods of statistical analysis in facies zoning of modern marine basins.

Keywords: organic carbon, carbon distribution, diagenesis, bottom sediments of the Sea of Okhotsk, bottom sediments of the Pacific Ocean, modern sediments, Pearson correlation analysis, regression analysis

For citation: Syromyatnikov K.V., Levitan M.A., Gabdullin R.R. Detailed modern facies structure of Kuril Basin and Western Pacific Ocean according to univariate regression and one-factor variance analyses. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 5: 39–49. (In Russ.).

Введение. Литолого-фациальный анализ современных осадков морей и океанов, как известно, имеет своей целью выявление фациальной структуры рассматриваемого бассейна седиментации с помощью выделения фациальных индикаторов, изучения и картирования их изменчивости, установления соответствия литофаций фациальным условиям накопления осадков. Естественно, что такие исследования представляют интерес также и для литологов, изучающих более древние бассейны осадконакопления с помощью сравнительно-литологического метода [Страхов, 1945]. В последние годы все чаще литологи не останавливаются на описании полученных результатов в качественном виде, а стараются подтвердить их на основе применения методов корреляционного, одномерного регрессионного и однофакторного дисперсионного анализов, указывая, например, достоверность, доверительный интервал и прочие параметры [Занин и др., 2011; Сыромятников, Левитан, 2014; Сыромятников, Габдуллин, 2022; Hongjun, et al., 2017; Nasra, et al., 2014].

Изучению процессов седиментации в исследуемом нами регионе посвящено множество научных работ российских и зарубежных коллег [Безруков, 1955; Безруков, Мурдмаа, 1959; Горбаренко и др., 2000; Терехов и др., 2008; Деркачев и др., 2004; Патрикеев и др., 2016; Wang, et al., 2011; Higgins, et al., 1999; Nürnberg, Tiedemann, 2004]. В качестве основы для исследования мы выбрали статью [Саттарова, Аксентов, 2019], содержащую значительный массив гранулометрических и геохимических данных по поверхностному слою донных осадков, собранных в нескольких рейсах научно-исследовательских судов в Охотском море, на северо-западе Тихого океана и в Беринговом море. Материалы по последнему району в нашей работе не использовались.

Основной целью является изучение особенностей седиментации трех рассматриваемых областей и связанных с ними подобластей исследуемого региона на основе методов статистического анализа.

Поставленные задачи решались с помощью применения корреляционного анализа Пирсона в программе Excel в соответствии с методикой [Берк, Кэйри, 2005], а также методов однофакторного дисперсионного и одномерного регрессионного анализов в программе Statgraphics plus v. 5.

Материалы и методы исследований. На рис. 1 показано расположение изученных проб с номерами океанологических станций. В статье использованы данные по геохимии и гранулометрии поверхностных осадков, отобранных в ходе международных научных экспедиций на научно-исследовательских судах «Sonne» (рейс So223, 2012 г.) и «Академик М.А.

Лаврентьев» (рейсы LV55 — 2011 г., LV63 — 2013 г., LV71 — 2015 г.) Гранулометрический состав определяли с использованием лазерного анализатора частиц ANALYSETTE 22 (FRITZSCH, Германия) по методике, описанной в [Боцул, 2002]. Определение содержания общего органического углерода проводилось на анализаторе TOC-VCPN с приставкой для сжигания твердых проб SSM-5000A (SHIMADZU, Япония). Относительное стандартное отклонение составило 1,5 % для общего углерода и 2,0 % — для неорганического. Химический анализ выполнен в Центре коллективного пользования Дальневосточного геологического института ДВО РАН. Для проведения литохимического анализа пробы предварительно сушили в сушильном шкафу при температуре 30–50 °С до воздушно-сухого состояния. Подготовка проб осуществлялась методом открытого кислотного разложения [Саттарова, Аксентов, 2019].

Результаты исследования и их обсуждение. Изучение представленного в статье [Саттарова, Аксентов, 2019] материала позволило нам впервые выделить три литолого-фациальные области: Курильскую котловину Охотского моря, Курило-Камчатский глубоководный желоб и северо-западную часть Тихого океана. В каждой области выделены две подобласти (табл. 1). В качестве фациальных индикаторов выбраны: гранулометрический состав, отношение Si/Al и содержания Ti, Fe, Th, C_{орг}. Отношение Si/Al выбрано нами для качественной оценки содержания биогенного кремнезема в осадках изученных областей. Как известно, алюминий поступает в морские осадки исключительно за счет терригенного сноса с прилегающей суши, входя в состав глинистых минералов и детритового материала. Биогенный опал, напротив, содержит почти чистый SiO₂ без значимых количеств алюминия. Поэтому увеличение доли биогенного опала ведет к возрастанию общего отношения Si/Al в осадке. При этом количество песчаного материала, где наиболее высоко содержание терригенного кварца, резко понижено по сравнению с алевритовыми и пелитовыми фракциями (табл. 1). В данном случае содержание общего кремнезема [Овсепян и др., 2014] представляет собой суммарное значение биогенной и терригенной его частей. В то же время содержание Al в основном связано с терригенным пелитовым материалом. Данные по гранулометрическому составу приведены в табл. 1, а по химическому составу — в табл. 2, 3.

В результате проведения однофакторного дисперсионного анализа было исследовано 34 образца донных осадков трех выделенных фациальных областей и их подобластей на основе анализа геохимических и гранулометрических данных [Саттарова,

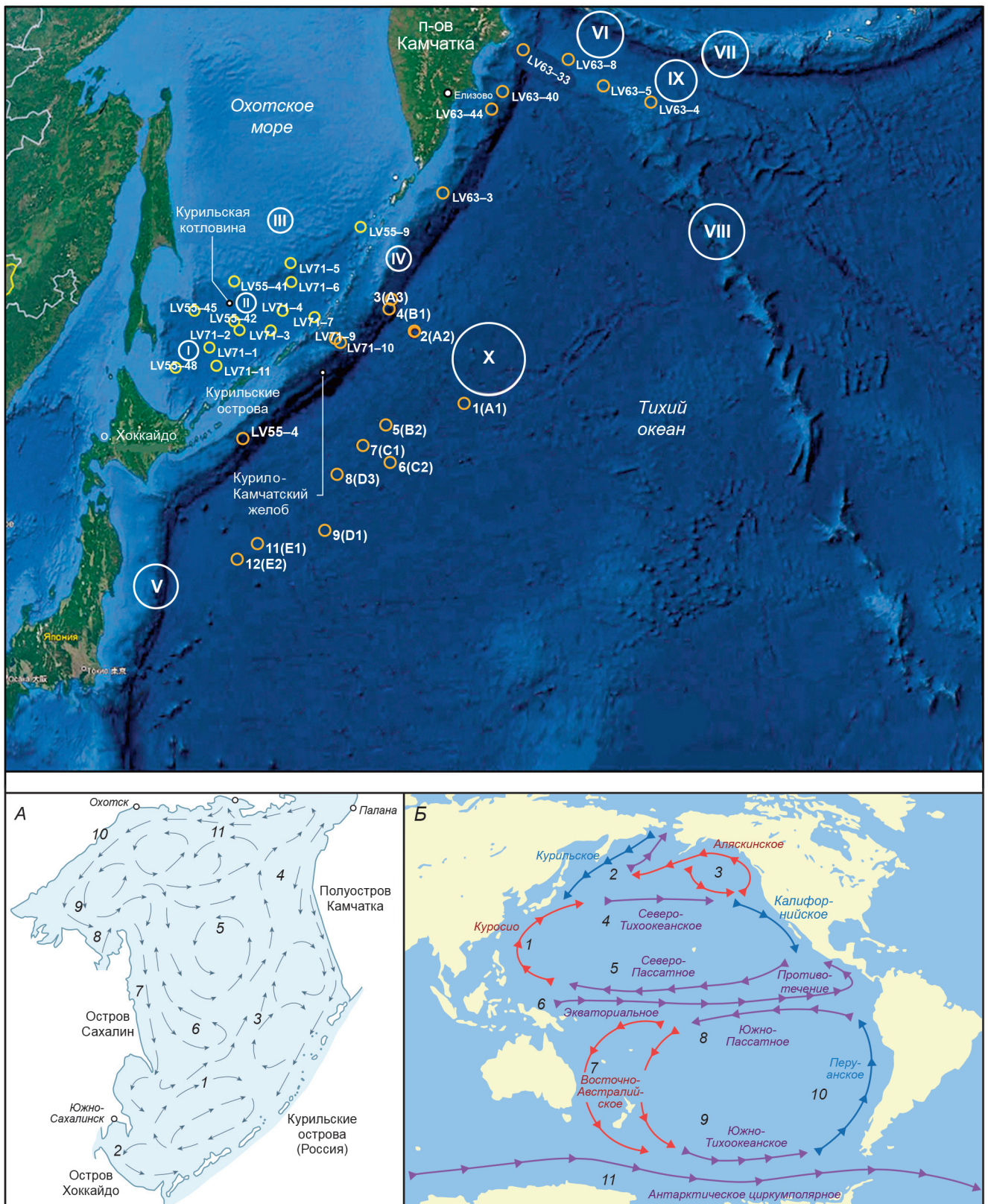


Рис. 1. Обзорная карта района исследования с положением станций отбора проб [Саттарова, Аксентов, 2019]: I — Присахалинский (Западный прогиб), II — Прикурильский (Восточный прогиб), III — возвышенность Академии Наук, IV — Вал Зенкевича, V — Японский вал, VI — возвышенность Обручева, VII — Алеутская островная дуга, VIII — Императорская вулканическая зона, IX — возвышенность Детройта, X — Северо-Западная котловина (северо-западной части Тихого океана). А — стрелками показаны направления перемещения поверхностных течений в Охотском море: 1 — Северо-восточное течение, 2 — течение СОЯ, 3 — Западно-камчатское, 4 — Северная ветвь, 5 — Срединное течение, 6 — Восточно-сахалинское противотечение, 7 — Восточно-сахалинское, 8 — Мурское, 9 — Северо-охотское противотечение, 10 — Северо-охотское, 11 — Ямское. Б — стрелками показаны направления перемещения поверхностных течений в северо-западной части Тихого океана: 1 — Кюросио, 2 — Курильское, 3 — Аляскинское; 4 — Северо-Тихоокеанское; 5 — Северо-Пассатное; 6 — Экваториальное противотечение, 7 — Восточно-Австралийское течение, 8 — Южно-Пассатное, 9 — Южно-Тихоокеанское, 10 — Перуанское, 11 — Антарктическое циркумполярное

Таблица 1

Расположение проб поверхностного слоя донных осадков в южной части Охотского моря и северо-западной части Тихого океана и их гранулометрический состав [Саттарова, Аксентов, 2019, с изменениями]

ФП	Станция	Координаты		Глубина, м	Гранулометрический состав, %		
		с.ш.	в.д.		>0,063 мм	0,004–0,063 мм	>0,004 мм
1	LV71-1	46°08,8'	146°00,0'	3481	0	46	54
1	LV71-2	46°41,08'	147°27,99'	3352	0	53	47
1	LV71-3	46°38,002'	148°59,995'	3363	0	46	54
1	LV71-4	47°12,005'	149°36,992'	3366	0	67	33
1	LV71-6	48°02,960'	150°00,292'	3351	2	55	43
1	LV71-7	46°57,020'	151°5,011'	3300	4	65	31
1	LV71-11	45°36,300'	146°23,100'	3206	0	44	56
1	LV55-42	46°56,91'	147°12,289'	3354	0	43	57
2	LV71-5	48°37,261'	150°00,315'	1700	0	71	29
2	LV55-9	49°31,255'	153,27,141'	1937	0	78	21
2	LV55-41	48°9,488'	147°8,372'	1639	0	49	51
2	LV55-45	47°18,395'	145°10,358'	2426	0	78	21
2	LV55-48	45°33,14'	144°19,964'	767	0	55	45
3	LV55-4	43°24,743'	147°36,978'	2909	1	76	24
3	LV71-9	46°16,086'	152°02,101'	3430	2	74	24
3	LV63-3	50°12,6995'	157°28,5013'	1495	46	37	17
3	LV63-40	52°59,2205'	160°56,5172'	2927	34	43	22
3	LV63-44	52°30,9397'	160°16,9615'	1668	2	62	37
4	4(B1)	46°58,001'	154°32,703'	5767	0	57	43
4	LV71-10	46°07,870'	152°12,182'	4722	0	71	29
4	3(A3)	47°14,261'	154°42,319'	4976	1	78	21
5	LV63-4	51°37,5235'	167°49,7646'	2951	11	63	26
5	LV63-5	52°29,0948'	165°49,9814'	3131	21	56	23
5	LV63-8	53°33,9217'	164°27,5782'	3083	22	52	26
5	LV63-33	54°20,0411'	162°07,1840'	1465	14	58	28
6	1(A1)	43°58,190'	157°19,796'	5412	0	68	31
6	2(A2)	46°14,024'	155°33,100'	4869	0	67	33
6	5(B2)	43°34,990'	153°57,964'	5378	8	67	25
6	6(C2)	42°29,002'	153°59,905'	5297	1	71	28
6	7(C1)	43°02,217'	152°59,129'	5222	1	77	22
6	8(D3)	42°14,614'	151°43,506'	5127	0	76	24
6	9(D1)	40°35,012'	150°59,630'	5401	0	63	37
6	11(E1)	40°12,891'	148°06,042'	5349	0	67	33
6	12(E2)	39°43,417'	147°10,014'	5229	0	72	28

Примечания. Для выделения гранулометрических типов использована шкала С.К. Уэнтворта [Wentworth, 1922], цит. по [Фролов, 1993]. Фациальные подобласти (ФП): 1 — абиссальная равнина Курильской котловины, 2 — северный склон Курильской котловины, 3 — островной склон Курило-Камчатского желоба, 4 — тальвег Курило-Камчатского глубоководного желоба, 5 — поднятия Обручева и Детройта, 6 — Северо-Западная глубоководная котловина Тихого океана.

Таблица 2

Результаты однофакторного дисперсионного анализа по распределению Th (мг/кг); отношению Si/Al; $C_{орр}$, Ti и Fe (масс. %) в изученных донных осадках

Параметры	Источник	Сумма квадратов, SS	Степени свободы, Df	Средние квадраты	F-отношение	P-значение
Th, мг/кг	Между группами	48,93	5	9,79	6,07	0,0006
	Внутри групп	45,12	28	1,61		
	Общая	94,05	33			
Si/Al	Между группами	28,84	5	5,77	4,31	0,005
	Внутри групп	37,43	28	1,34		
	Общая	66,26	33			
$C_{орр}$, %	Между группами	2,41	5	0,48	4,53	0,0037
	Внутри групп	2,97	28	0,11		
	Общая	5,38	33			
Fe, %	Между группами	8,02	5	1,60	3,6	0,0122
	Внутри групп	12,46	28	0,45		
	Общая	20,48	33			
Ti, %	Между группами	0,09	5	0,02	5,46	0,0013
	Внутри групп	0,09	28	0,003		
	Общая	0,18	33			

Аксентов, 2019]. Главным образом рассматривалось соотношение средних показателей по содержанию химических индикаторов обстановок осадконакопления, характерных для трех выделенных областей и трех подобластей. В табл. 2 и 3 приведены результаты дисперсионного анализа: 1) суммы квадратов (SS, Sum of Squares) — инструмент, который используют для оценки общего отклонения набора данных от среднего значения; 2) степени свободы (DF, degrees of freedom) — количество значений или наблюдений в выборке, которые могут быть изменены независимо друг от друга без изменения ее структуры; 3) средние квадраты или среднеквадратичное отклонение отражает меру разброса данных относительно среднего значения (MS, Mean Square); 4) значения критерия Фишера (критерий рассеивания) определяется отношением средних квадратов между группами к средним квадратам внутри групп и служит для проверки равенства дисперсий двух выборок; 5) P-value или уровень значимости статистической модели.

Фациальное районирование. Курильская котловина. Курильская котловина имеет клиновидную форму и несколько сужается к северу (рис. 1). Она представляет собой абиссальную равнину, оконтуренную по изобате 3000 м [Родников и др., 2005]. Несколько изученных проб взяты на меньших глубинах, относящихся к северному склону рассматриваемой котловины.

Поверхностный слой донных осадков Охотского моря на большей части его площади представлен

Таблица 3

Распределение Th (мг/кг); отношения Si/Al; $C_{орг}$, Ti и Fe (масс. %) в донных осадках изученных фациальных подобластей с уровнем достоверности 95 %

Параметры	ФП	Кол-во образцов	Среднее значение	Стандартная ошибка	Мин. значение	Макс. значение	95 % доверительный интервал для среднего	
							Нижняя граница	Верхняя граница
Th, мг/кг	1	8	4,05	0,45	1,75	5,82	3,40	4,70
	2	5	4,04	0,57	1,32	6,57	3,22	4,86
	3	5	1,62	0,52	1,42	1,92	0,87	2,37
	4	3	2,47	0,73	1,90	2,76	1,41	3,53
	5	4	2,22	0,73	2,11	2,35	1,16	3,29
	6	9	4,82	0,42	3,73	6,80	4,21	5,43
	Общее	34	3,52	–	1,32	6,8		
Si/Al	1	8	5,93	0,41	4,99	7,98	5,34	6,53
	2	5	7,17	0,52	5,54	8,75	6,42	7,91
	3	5	4,77	0,47	3,46	8,83	4,08	5,45
	4	3	5,05	0,67	3,91	5,97	4,08	6,02
	5	4	4,04	0,67	3,73	4,37	3,07	5,01
	6	9	4,86	0,39	4,35	5,51	4,30	5,41
	Общее	34	5,37	–	3,46	8,83		
$C_{орг}$, %	1	8	1,47	0,45	0,84	1,92	1,30	1,64
	2	5	1,41	0,57	1,28	1,67	1,20	1,62
	3	5	1,20	0,52	0,79	1,55	1,01	1,39
	4	3	1,16	0,73	0,95	1,55	0,89	1,43
	5	4	0,64	0,73	0,57	0,79	0,37	0,92
	6	9	0,92	0,42	0,44	1,45	0,77	1,08
	Общее	34	1,17	–	0,44	1,92		
Fe, %	1	8	3,19	0,45	2,41	4,03	2,85	3,54
	2	5	2,85	0,57	2,35	3,59	2,41	3,28
	3	5	4,25	0,52	2,15	5,37	3,86	4,65
	4	3	3,98	0,73	3,37	4,97	3,42	4,54
	5	4	3,50	0,73	2,86	4	2,94	4,05
	6	9	3,11	0,42	2,46	3,75	2,79	3,43
	Общее	34	3,40	–	2,15	5,37		
Ti, %	1	8	0,24	0,45	0,18	0,30	0,21	0,26
	2	5	0,21	0,57	0,17	0,25	0,17	0,25
	3	5	0,35	0,52	0,17	0,43	0,32	0,39
	4	3	0,33	0,73	0,26	0,42	0,28	0,37
	5	4	0,32	0,73	0,25	0,38	0,27	0,37
	6	9	0,25	0,42	0,19	0,31	0,22	0,28
	Общее	34	0,27	–	0,17	0,43		

Примечания: фациальные подобласти (ФП) — см. прим. к табл. 1; при большом числе выборок из генеральной совокупности 95 % средних значений этих выборок попадут в интервал, определяемый нижней и верхней границами. Составлено авторами на основе данных [Саттарова, Аксентов, 2019].

тонкими терригенными илами, обогащенными остатками диатомей [Безруков, 1955; Страхов, 1979]. На северном склоне Курильской котловины в интервале изученных глубин 767–2426 м на поверхности дна залегают зеленовато-серые алевриты, пелитово-алевритовые и алевритово-пелитовые терригенные илы с заметной примесью диатомей.

Глубже 3000 м абиссальная равнина Курильской котловины сложена оливковыми пелитово-алевритовыми и алевритово-пелитовыми илами аналогичного состава, но среднее содержание алевритовой фракции в них заметно ниже. Отметим отсутствие в изученных осадках Курильской котловины песчаной фракции.

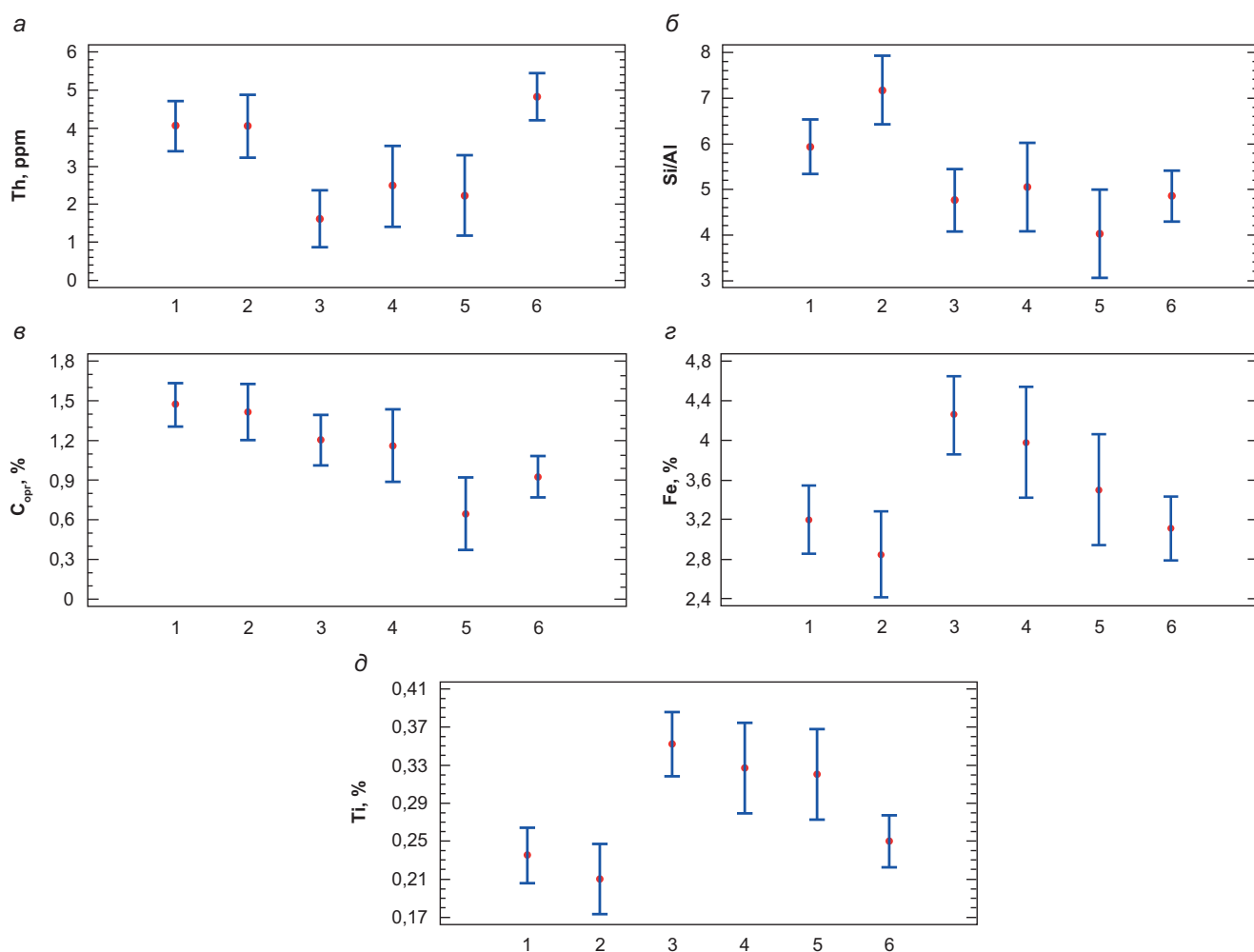


Рис. 2. Средние и 95 % доверительные интервалы распределения: а — Th, мг/кг, б — отношения Si/Al, в — органического углерода ($C_{орг}$, %), г — Fe, %, д — Ti, % в донных осадках трех фациальных областей и подобластей южной части Охотского моря и северо-западной части Тихого океана: 1 — Курильская котловина, 2 — северный склон Курильской котловины, 3 — островной склон Курило-Камчатского желоба, 4 — Курило-Камчатский желоб, 5 — поднятия Обручева и Детройта, 6 — Северо-Западная котловина северо-западной части Тихого океана

Корреляционный анализ показал, что с алевритовой фракцией (рис. 2) тесно связаны содержания Si и Ca, положительная незначительная корреляция также найдена для Sc и Sr (рис. 2). Таким образом, на основе данных дисперсионного анализа биогенные компоненты осадков (кремнистые и карбонатные) приурочены, в основном, к алевритовой фракции (рис. 3). Остальные элементы (и $C_{орг}$) демонстрируют положительную корреляцию с содержанием пелитовой фракции, при этом значимые величины коэффициентов Пирсона обнаружены для K, Nb, Cs, Th, Pb, Rb, Zn, Zr (рис. 3).

В целом для осадков рассматриваемой литолого-фациальной области характерны повышенные значения отношения Si/Al, содержаний $C_{орг}$ и Th (табл. 3). Первые два параметра свидетельствуют о заметном вкладе биогенного опада, а последний — о важной роли терригенного материала. В плейстоценовых диатомовых глинах и илах Тихого океана отношение Si/Al в среднем равно 9,52 [Левитан и др., 2025], что намного превышает указанные в табл. 3 значения для осадков Курильской котловины. Содержания Fe

и Ti в исследованных осадках довольно низкие, что можно рассматривать как доказательство незначительной поставки вулканогенного вещества. Вывод об отсутствии заметного влияния вулканизма на геохимию современных осадков Курильской впадины известен уже давно [Страхов, 1979].

Поверхностная циркуляция в море определяется барической ситуацией в атмосфере. Над Курильской котловиной располагается антициклонический круговорот циркуляции поверхностной водной массы [Верхунов, 1997]. В его формировании ведущую роль играет впадающее из Японского моря течение Соя (рис. 1). Следует отметить, что циркуляция в Курильской котловине представлена четырьмя антициклоническими вихрями, центры которых находятся в следующих координатах: (146° в.д., 46° с.ш.), (149,5° в.д., 46,5° с.ш.), (153° в.д., 49,5° с.ш.) и (154,5° в.д., 50,6° с.ш.). С увеличением глубины активность этих вихрей значительно ослабевает. Начиная с глубины полутора километров и до дна усиливаются циклонические вихри (146° в.д. 47° с.ш.) (148° в.д. 47,5° с.ш.) (151° в.д. 48,5° с.ш.) [Циркуляция..., 2018]. В центре

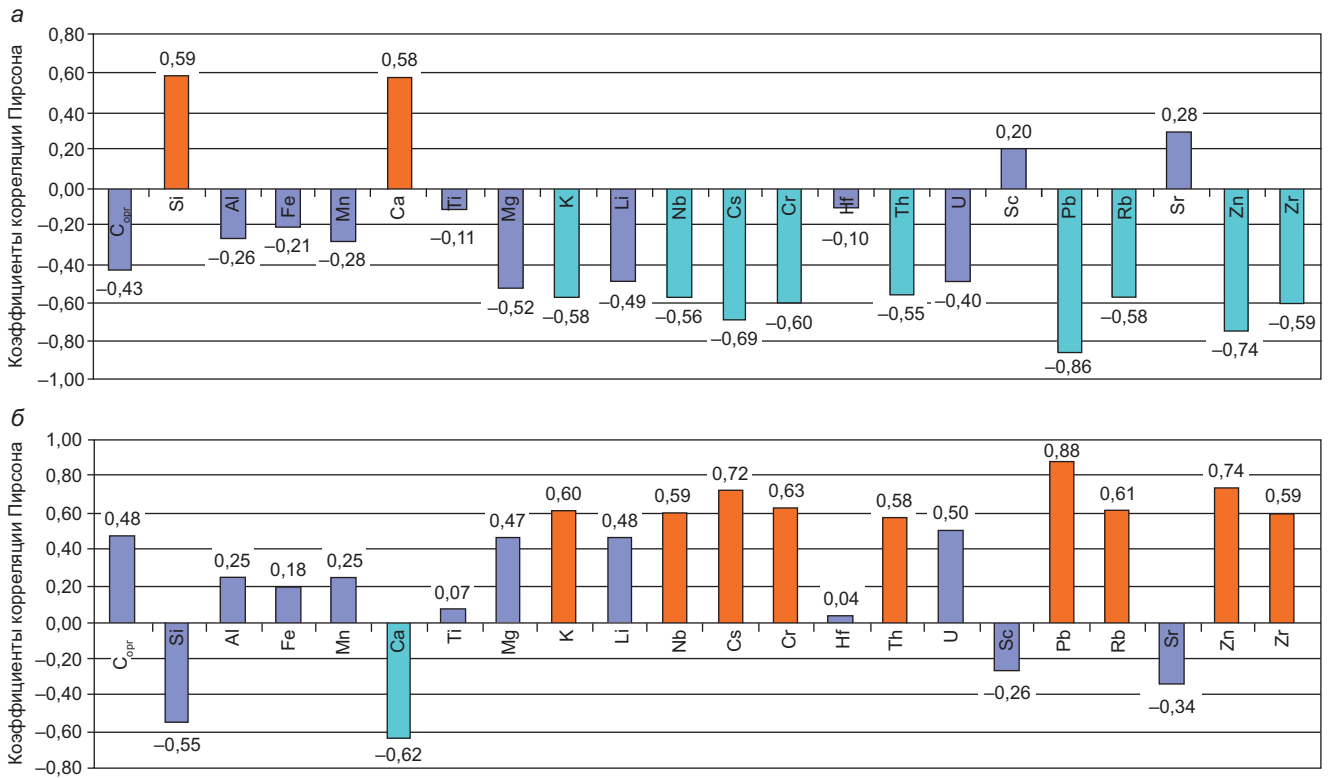


Рис. 3. Результаты корреляционного анализа Пирсона для донных осадков Курильской котловины и ее северного склона (южной части Охотского моря): а — по взаимосвязи фракций алеврита, химических элементов и органического углерода; б — по взаимосвязи фракций пелита, химических элементов и органического углерода. Для донных осадков Курило-Камчатского желоба, его островного склона, Северо-Западной котловины и поднятий Обручева и Детройта (северо-западной части Тихого океана): в — по взаимосвязи фракций алеврита, химических элементов и органического углерода; г — по взаимосвязи фракций пелита, химических элементов и органического углерода

круговорота над Курильской котловиной скорости течений составляют 11–20 см/с, а на периферии возрастают в несколько раз (в районе течения Соя от 50 до 90 см/с) [Добровольский, Залогин, 1982].

Материалы по среднегодовой силе ветрового воздействия на поверхность воды для южной части Охотского моря по данным с 1981 по 2022 гг. из базы данных NASA [Data..., 2024] и среднегодовой температуре воды из этой же базы обработаны нами с помощью одномерного регрессионного анализа (табл. 4 и 5). В результате установлена их прямая линейная взаимосвязь (табл. 5, а; рис. 4, а). Как известно Охотское море зимой и весной покрыто морским льдом, особенно в его северо-западной части (залив Шелихова и акватория у Сахалина). В эти периоды времени ветер разрушает ледяной покров и способствует открытию водной поверхности, которая быстрее поглощает солнечную радиацию и нагревается [Martin, et al., 1998]. Отсюда следует, что сила ветрового воздействия и температура поверхности моря убывают от центра антициклонического круговорота к его периферии. В том же направлении, как было отмечено, возрастают и скорости поверхностных течений в круговоротах, однако точных результатов измерений скоростей этих течений не имеется.

Представляет заметный интерес установленная нами с помощью одномерного регрессионного анализа прямая нелинейная взаимосвязь между среднегодовой температурой поверхности моря и содержанием пелитовой фракции, а также отрицательная ее связь с содержанием алевритовой фракции в поверхностном слое донных осадков Курильской котловины (табл. 5, б; рис. 4, б, в). Приуроченность относительно крупнозернистых донных осадков к прибрежным районам Охотского моря известна уже давно [Безруков, 1955]. Кроме того, хорошо известно воздействие придонных течений на осадки склонов различного генезиса, что приводит к вымыванию пелитовых фракций. Вероятно, основной причиной отмеченной выше закономерности (табл. 5) является сохранение круговорота Курильской котловины вглубь водной толщи, следствием чего является удаление части пелитовой фракции из донных осадков на склоне котловины под воздействием более сильных придонных течений, чем на абиссальном дне. Нельзя полностью исключить влияние и других природных факторов на формирование отмеченной закономерности. Проблема требует дальнейшего изучения.

В июне-августе первичная продукция в столбе воды в районе Курильской котловины может состав-

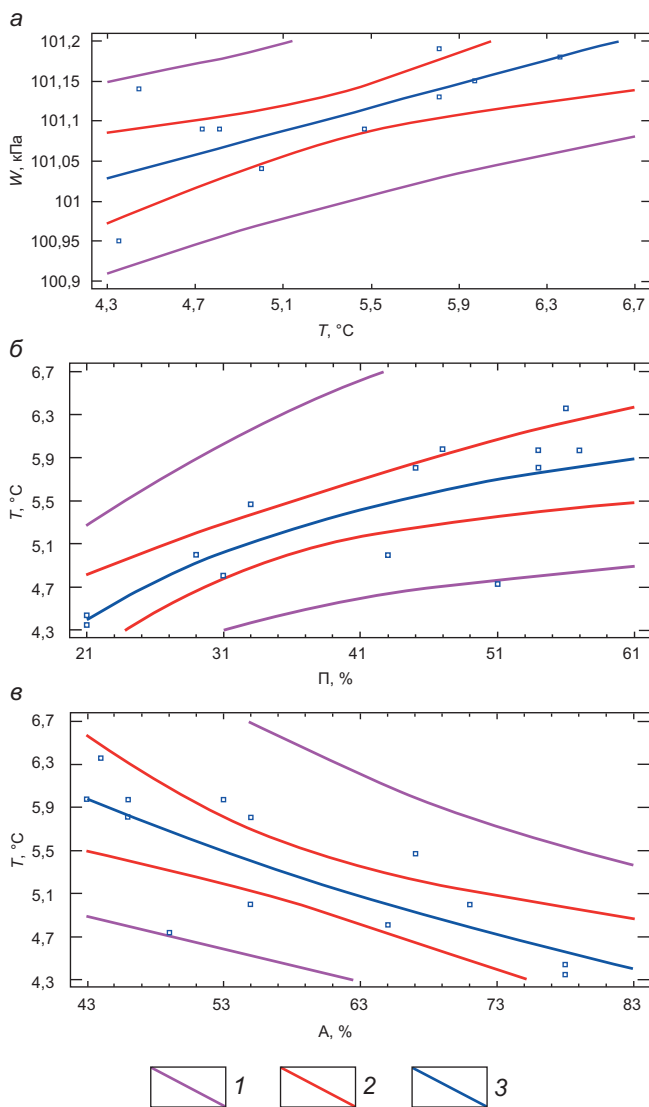


Рис. 4. Результаты одномерного регрессионного анализа для донных осадков Курильской впадины южной части Охотского моря: а — прямая линейная взаимосвязь силы ветрового воздействия на поверхность воды и среднегодовой поверхностной температуры воды (T , °C); б — прямая нелинейная взаимосвязь поверхностной среднегодовой температуры воды (T , °C) и пелита; в — прямая нелинейная взаимосвязь поверхностной среднегодовой температуры воды (T , °C) и алеврита. 1 — доверительный интервал, соответствующий предсказанному значению регрессии; 2 — доверительный интервал для среднего значения предсказанных значений регрессии; 3 — линия регрессии

лять 1200–1500 мгС/м² в день, опускаясь в декабрь-феврале практически до нуля [Агатова и др., 2016; Behrenfeld, Falkowski, 1997]. Следует отметить, что среднее многолетнее положение кромки морского льда [Минервин и др., 2015] находится несколько севернее Курильской котловины.

Принято считать, что основным источником терригенного материала в Охотском море является твердый сток р. Амур; дополнительную роль играют абразия берегов и (на севере моря) деятельность морского льда и эоловый перенос [Безруков, 1955].

Таким образом, в литолого-фациальной области Курильской котловины выделяются две фаціаль-

Таблица 4

Данные по среднегодовым поверхностным температурам моря над Курильской впадиной (по данным базы данных NASA за 1981–2022 гг.) [Data, 2024]

№ станции	ФП	Долгота	Широта	T , °C
LV71-1	1	46°08,8'	146°00,0'	5,97
LV71-2	1	46°41,08'	147°27,99'	5,97
LV71-3	1	46°38,002'	148°59,995'	5,81
LV71-4	1	47°12,005'	149°36,992'	5,47
LV71-6	1	48°02,960'	150°00,292'	5,00
LV71-7	1	46°57,020'	151°5,011'	4,81
LV71-11	1	45°36,300'	146°23,100'	6,36
LV55-42	1	46°56,91'	147°12,289'	5,97
LV71-5	2	48°37,261'	150°00,315'	5,00
LV55-9	2	49°31,255'	153,27,141'	4,35
LV55-41	2	48°9,488'	147°8,372'	4,73
LV55-45	2	47°18,395'	145°10,358'	4,44
LV55-48	2	45°33,14'	144°19,964'	5,81

Примечания. Указаны координаты станций опробования донных осадков; измеренные температуры соответствуют этим координатам на поверхности моря. Фациальные подобласти (ФП) см. табл. 1.

Таблица 5

Уравнения регрессии силы воздействия ветра на поверхность моря (W , кПа) и взаимосвязи показателей среднегодовой поверхностной температуры поверхности моря (T , °C) с алевритовой и пелитовой фракциями

Уравнение регрессии	Количество исследуемых образцов	Коэффициент корреляции, R , %	Коэффициент детерминации, R^2 , %	Стандартная ошибка регрессии	p-value
а) Воздействие силы ветра на поверхность моря					
$W = 100,7 + 0,074T$	13	0,82	67,09	0,02	0,0006
б) Температура					
$T = 1/(0,139 + 1,85/П)$	13	0,82	67,09	0,02	0,0006
$T = 1/(0,1023 + 0,0015A)$	13	-0,8	62,06	0,02	0,001

Примечания. П — содержание пелитовой фракции (масс. %); А — содержание алевритовой фракции, в масс. %.

ные подобласти: абиссальная равнина и северный склон.

Курило-Камчатский глубоководный желоб. Рассматриваемый желоб имеет в длину 2170 км. Его средняя ширина составляет 59 км, а наибольшая глубина — 9717 м [Гнибиденко и др., 1980]. Поверхностные осадки представлены серо-зелеными терригенно-вулканогенными отложениями с примесью диатомей. На островном склоне на глубинах от 1495 до 2927 м среди изученных проб развиты алеврито-

вые пески, миктиты, алевриты и пелитово-алевритовые илы. В тальвеге желоба на глубинах от 4722 до 5767 м найдены алевриты и пелитово-алевритовые илы. Не исключено, что заметная роль песчано-алевритовой фракции в осадках склона связана с гравитационными процессами, например, с подводными оползнями и формированием дебритов.

В целом для осадков рассматриваемой литолого-фациальной области характерны средние значения отношения Si/Al и содержания $C_{\text{орг}}$ (табл. 3), что свидетельствует о довольно заметном вкладе биогенного опала. Выше отмечалось, что в плейстоценовых диатомовых глинах и илах Тихого океана отношение Si/Al в среднем равно 9,52 [Левитан, 2021], что намного превышает указанные в табл. 3 значения для осадков Курило-Камчатского глубоководного желоба. Концентрация Th — 1,62 мг/кг (табл. 3) — минимальна среди всех изученных осадков, указывая на очень низкий вклад терригенного материала. Содержания Fe (4,25 %) и Ti (0,35 %) напротив, максимальные (табл. 3), что можно рассматривать как доказательство важной роли вулканогенного вещества. О том же свидетельствуют и спектры РЗЭ, в частности, явное повышение отношения тяжелых РЗЭ к легким в осадках островного склона [Саттарова, Аксентьев, 2019].

В поверхностной водной массе над Курило-Камчатским глубоководным желобом расположена та же зона повышенной первичной продукции, что и над Курильской котловиной [Behrenfeld, Falkowski, 1997]. Осадочный абиогенный материал поступает в желоб с Курильских островов и южной части Камчатки. Некоторую роль в разносе осадочного вещества играет перенос с помощью Курильского поверхностного течения, направленного на юго-запад (рис. 1). Важную роль в транспортировке осадочного материала, донной эрозии и аккумуляции играют гравитационные процессы, типичные для крутых подводных склонов. Определенное значение в современном осадконакоплении имеет поставка эксплозивного вещества, продуцируемого вулканами Курил и Камчатки.

Таким образом, в пределах изученной литолого-фациальной области Курило-Камчатского глубоководного желоба выделяются две фациальные подобласти: островной склон и тальвег желоба.

Северо-западная часть Тихого океана. Исследованные в статье [Саттарова, Аксентьев, 2019] пробы поверхностного слоя донных осадков из северо-западной части Тихого океана (рис. 1) относятся к двум заметно отличающимся друг от друга структурам: к Северо-Западной глубоководной котловине и к подводному хребту к северу от Императорского хребта, состоящему из поднятий Обручева и Детройта.

Абиссальная равнина на поверхности упомянутой котловины покрыта тонкими глинистыми илами [Маккой и др., 2003]. Изученные осадки, взятые с глубин от 4869 до 5412 м, представлены коричневыми и темнокоричневыми пелитово-алевритовыми

ми илами и алевритами (табл. 1). По совокупности рассмотренных химических параметров (табл. 3) и содержанию Mn [Саттарова, Аксентьев, 2019] их можно отнести к разновидностям пелагических глин, напоминающих плейстоценовые пелагические глины Тихого океана [Левитан и др., 2025]. Для этих осадков характерны несколько пониженные значения отношения Si/Al (4,86) и $C_{\text{орг}}$ (0,92 %) и повышенные Th (4,82 %), содержания Ti (0,25 %) и Fe (3,11 %) (табл. 3).

На указанных поднятиях Обручева и Детройта с глубин от 1465 до 3131 м подняты песчано-пелитовые алевриты (табл. 1) светло-коричневого цвета. Отношение Si/Al (4,04 %) и содержание Fe (3,5 %) в них соответствует гемипелагическим плейстоценовым глинам Тихого океана [Левитан и др., 2025], концентрации $C_{\text{орг}}$ (0,64 %) и Ti (0,32 %) [Саттарова, Аксентьев, 2019] понижены, а среднее содержание Th равно 2,22 мг/кг. Обилие песчано-алевритовой фракции и цвет осадка обусловлены, главным образом, расположением образцов несколько выше поверхности критической глубины. Поэтому в осадках присутствует заметное количество раковинок фораминифер и содержание CaCO_3 колеблется в интервале примерно от 10 до 27,5 % [Саттарова, Аксентьев, 2019]. Определенную роль в формировании гранулометрического состава осадков могла сыграть повышенная гидродинамическая активность придонного слоя водной толщи, столь характерная для гребневых частей подводных возвышенностей различного генезиса. Она способствовала вымыванию пелитовых и, частично, мелкоалевритовых фракций из осадка.

В целом для рассматриваемого региона типична низкая первичная продукция [Behrenfeld, Falkowski, 1997]. Считается, что терригенный материал поступает как эоловым путем с запада, с пространств Восточной Азии [Ziegler, et al., 2007], так и с Алеутским течением из Берингова моря [Ohtani, 1970]. Повышенное содержание Th в осадках подводных возвышенностей может быть обусловлено близостью к Алеутским островам. Влияние вулканической деятельности, скорее всего, незначительно.

Таким образом, в пределах изученной литолого-фациальной области северо-западной части Тихого океана выделяются две фациальные подобласти: Северо-Западная глубоководная котловина и поднятия Обручева и Детройта.

Заключение. Выполненный авторами анализ позволил в пределах изученного региона (юг Охотского моря и северо-запад Тихого океана) выделить три литолого-фациальные области: Курильскую котловину, Курило-Камчатский глубоководный желоб и северо-западную часть Тихого океана. В пределах каждой из перечисленных областей выделены две фациальные подобласти, описанные выше.

Для Курильской котловины характерны: высокая первичная продукция, обусловленная развитием диатомовых водорослей; доминирование терригенного

материала, связанного, прежде всего, с выносами р. Амур; отсутствие заметного влияния вулканической деятельности на геохимию донных осадков; предполагаемое воздействие гидродинамики водной толщи на гранулометрию и химический состав осадков.

Фациальная специфика Курило-Камчатского глубоководного желоба обусловлена, прежде всего, его тектоническим положением и геоморфологическими особенностями. Для этой области типичны: довольно высокая первичная продукция, связанная с диатомеями; слабая поставка флювиогенного терригенного материала и высокая — вулканотерригенного вещества с Курильских островов и Южной Камчатки; большая роль гравитационных процессов в транспортировке, донной эрозии и аккумуляции осадков на островном склоне.

На северо-западе Тихого океана в фациальном плане четко выделяется Северо-Западная глубоководная котловина с ее современными пелагическими глинами, низкой первичной продукцией, слабой поставкой терригенного вещества (в комплексе с эоловым путем из Азии и Аляскинским течением из Берингова моря), почти незаметным влиянием вулканизма окружающих островодужных систем. Столь же четко проявлена вторая фациальная подобласть — подводное поднятие Обручева-Детройта. Для него типичны гемипелагические глины с повышенной ролью песчаной фракции фораминифер, нахождение выше поверхности критической глубины карбонатакопления, довольно низкая первичная продукция; повышенная поставка терригенного мате-

риала, вероятно, за счет близости к Алеутским островам; слабое влияние вулканической деятельности.

Однофакторный дисперсионный анализ дал возможность выявить и некоторые более общие закономерности (рис. 2). По таким индикаторам как Si/Al, Fe, Ti, Th достаточно явно разделяются Курильская котловина Охотского моря и Тихий океан. Вполне очевидна самая высокая биологическая продуктивность, наиболее крупный вклад терригенного материала и отсутствие влияния вулканизма в Курильской котловине; четкий тренд в Тихом океане от максимального проявления воздействия вулканизма в Курило-Камчатском глубоководном желобе до почти полного его отсутствия на подводном поднятии; противоположная тенденция роста влияния терригенного вещества, достигающая максимума на подводном поднятии. По распределению Сорг в современных осадках Курило-Камчатский глубоководный желоб близок к Курильской котловине и заметно отличается от северо-запада Тихого океана.

Применение методов математической статистики позволило надежно обосновать сделанные выводы по литолого-фациальному районированию изученного региона.

Финансирование. Работа авторов выполнена по теме государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) № FMMZ-2024-0028. Статья выполнена при частичном финансировании по государственному заданию МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. Органическое вещество, скорости его трансформации и продуктивность различных районов Охотского моря // Труды ВНИРО. 2016. Т. 164. С. 41–61.

Безруков П.Л. Донные отложения Курило-Камчатской впадины // Труды Института океанологии АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 12. С. 97–129.

Безруков П.Л., Мурдмаа И.О. Донные осадки Северо-Курильского района // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. 1959. Т. 36. С. 167–190.

Берк К., Кэйри П. Анализ данных с помощью Microsoft Excel.: Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2005. 560 с.

Боцул А.И. Лазерный измеритель размеров частиц «Analysette 22»: достоинства, недостатки и некоторые особенности использования при анализе донных осадков // Условия образования донных осадков и связанных с ними полезных ископаемых в окраинных морях. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 114–118.

Верхунов А.В. Развитие представлений о крупномасштабной циркуляции Охотского моря // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. Экология морей России / Отв. ред. В.В. Сапожников. М.: Изд-во ВНИРО, 1997. С. 8–19.

Гнибиденко Г.С., Быкова Т.Г., Веселов О.В. Тектоника Курило-Камчатского желоба. М.: Наука, 1980. 179 с.

Горбаренко С.А., Деркачев А.Н., Астахов А.С. и др. Литостратиграфия и тефрохронология верхнечетвертичных осадков Охотского моря // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19, № 2. С. 58–72.

Деркачев А.Н., Николаева Н.А., Горбаренко С.А. Особенности поставки и распределения кластогенного материала в Охотском море в позднечетвертичное время // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23, № 1. С. 37–52.

Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Охотское море. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. URL: <https://tapemark.narod.ru/more/19.html>. 2025 (дата обращения: 25.10.2024).

Занин Ю.Г., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г., Красавчиков В.О. Редкоземельные элементы в баженовской свите Западно-Сибирского осадочного бассейна // Литосфера, 2011. № 6. С. 38–54

Левитан М.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В., Сыромятников К.В. Геохимические особенности плейстоценовых отложений Тихого океана // Литология и полезные ископаемые. 2025. № 3. С. 245–272.

Маккой Ф.Х., Суинт Т.Р., Пайтер Д.Ц. Типы донных осадков // Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана / Гл. ред. Г.Б. Удинцев. М.; СПб., 2003. С. 114–115.

Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М. и др. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей // Вестн. РАН. 2015. Т. 85, № 3. С. 209–217.

Патрикеев В.П., Хортов А.В., Шлезингер А.Е. Строение и эволюция северо-западной континентальной окраины Тихого океана // Разведка и охрана недр. 2016. № 2. С. 26–30.

Овсепян Е.А., Иванова Е.В., Мурдмаа И.О., Алехина Г.Н. Изменения биопродуктивности в северо-западной части Тихого океана в течение последних 25 тыс. лет // Океанология. 2014. Т. 54, № 4. С. 546–560.

Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б. и др. Геотрансверс региона Охотского моря // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2005. № 5. С. 45–58.

Саттарова В.В., Аксентов К.И. Геохимия редкоземельных элементов в поверхностном слое донных осадков северо-западной Пацифики // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 2. С. 179–193.

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. О воздействии пирокластики на геохимию осадков Охотского моря // Химия океана. Т. 2. М.: Наука, 1979. С. 196–200.

Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р. Основные факторы седиментогенеза и раннего диагенеза в донных осадках Карского моря на основе методов математической статистики // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 99–113.

Сыромятников К.В., Левитан М.А. Применение дисперсионного и регрессионного анализов для изучения взаимоотношений ряда компонентов верхнеплиоценовых отложений Индийского океана // Геохимия. 2014. Т. 66, № 6. С. 114–126.

Терехов Е.П., Цой И.Б., Ващенко Н.Г. и др. Условия осадконакопления и история развития Курильской котловины (Охотское море) в кайнозое // Океанология. 2008. Т. 48, № 4. С. 615–623.

Фролов В.Т. Литология. Кн. 2. М.: Изд-во МГУ, 1993. 406 с.

Циркуляции вод Охотского моря. URL: http://ferhri.ru/images/stories/ferhri/science/Fayman/OS_atlas/4.pdf. 2025 (дата обращения: 25.10.2024).

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

Data Access Viewer (DAV). URL: <https://power.larc.nasa.gov> (дата обращения: 30.11.2024).

Higgins S.M., Broecker W., Anderson R., et al. Enhanced sedimentation along the Equator in the western Pacific // Geophys. Res. Letters. 1999. V. 26, № 23. P. 3489–3492.

Hongjun L., Lin L., Sheng Y., et al. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in the seawater and sediment of Yalujiang Estuary // Mar. Pollution Bull. 2017. Vol. 117. P. 499–506.

Nürnberg D., Tiedemann R. Environmental change in the Sea of Okhotsk during the last 1.1 million years // Paleoceanography. 2004. V. 19. P. 1–23.

Ohtani K. Relative transport in the Alaskan Stream in winter // J. Oceanogr. Soc. Japan. 1970. Vol. 26, № 5. P. 271–282.

Martin S., Drucker R., Yamash K. The production of ice and denseshelf water in the Okhotsk Sea polynyas // Journal of geophysical research. 1998. Vol. 103, № C12. P. 27,771–27,782.

Nasra S.M., Khairyb M.A., Okbahc M.A., Solimana N.F. AVS–SEM relationships and potential bioavailability of trace metals in sediments from the Southeastern Mediterranean Sea // Egypt. Chemistry and Ecology. 2014. Vol. 30. P. 15–28.

Wang H., Saito Yo., Zhang Yo., et al. Recent changes of sediment flux to the western Pacific Ocean from major rivers in East and Southeast Asia // Earth-Science Reviews. 2011. Vol. 108. P. 80–100.

Wentworth C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments // Journal of Geology. Vol. 30. 1922. P. 377–392.

Ziegler C.L., Murray R.W., Hovan S.A., Rea D.K. Resolving eolian, volcanogenic, and authigenic components in pelagic sediments from the Pacific Ocean // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. Vol. 254. P. 416–432.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025,
одобрена после рецензирования 23.05.2025,
принята к публикации 30.10.2025