

УДК 550.8.01: 550.85

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-73-85

ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ДОННЫХ ОСАДКОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

Кирилл Владимирович Сыромятников¹✉, Михаил Аркадьевич Левитан², Александр Сергеевич Ульяновцев³, Руслан Рустемович Габдуллин⁴

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

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; m-levitan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0012-3708>

³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия; uleg85@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

⁴ 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. В статье представлены результаты литолого-геохимического анализа донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря. На основании анализа геохимического и гранулометрического состава, соотношений элементов (Si/Al, Ti/Al, Fe+Ti, Mn/Al, Mn/Fe, V/(V+Ni)), содержания органического углерода и метана (CH₄) проведено районирование исследуемой акватории на четыре литолого-геохимические зоны. В результате проведения однофакторного дисперсионного и одномерного регрессионного анализов установлены связи между глубиной моря и геохимическими показателями. Выявлено влияние редокс-условий на процессы седиментации. Особое внимание уделено анализу условий анаэробного осадконакопления, и распределения органического вещества в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, шельф, донные осадки, современные осадки, литолого-геохимический анализ, геохимическое районирование, органический углерод, метан, терригенный материал, окислительно-восстановительные условия, анаэробность осадков, V/(V+Ni), дисперсионный анализ, регрессионный анализ

Для цитирования: Сыромятников К.В., Левитан М.А., Ульяновцев А.С., Габдуллин Р.Р. Литолого-геохимическая зональность донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 73–85.

LITHOLOGIC AND GEOCHEMICAL ZONALITY OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE SOUTHEASTERN PART OF THE EAST SIBERIAN SEA

Kirill V. Syromyatnikov¹✉, Mikhail A. Levitan², Alexander S. Ulyantsev², 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 Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia; uleg85@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; gabdullin@geokhi.ru

Abstract. The article presents the results of lithological and geochemical analysis of bottom sediments in the southeastern part of the East Siberian Sea. Based on the analysis of geochemical and granulometric composition, element ratios (Si/Al, Ti/Al, Fe+Ti, Mn/Al, Mn/Fe, V/(V+Ni)), organic carbon and methane (CH₄) content, the studied water area was divided into four lithological and geochemical zones. As a result of single-factor dispersion and one-dimensional regression analyses, correlations between sea depth and geochemical indicators were established. The influence of redox conditions on sedimentation processes was revealed. Particular attention was paid to the analysis of anaerobic sedimentation conditions and the distribution of organic matter in bottom sediments in the southeastern part of the East Siberian Sea.

Keywords: East Siberian Sea, shelf, bottom sediments, modern sediments, lithological and geochemical analysis, geochemical zoning, organic carbon, methane, terrigenous material, redox conditions, sediment anaerobicity, V/(V+Ni), analysis of variance, regression analysis

For citation: Syromyatnikov K.V., Levitan M.A., Ulyantsev A.S., Gabdullin R.R. Lithologic and geochemical zonality of bottom sediments of the southeastern part of the East Siberian Sea. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 73–85. (In Russ.).

Введение. Несмотря на многочисленные проведенные исследования [Пресов, Обжиров и др., 2009; Шакиров, Сорочинская и др., 2013; Левитан, Сы-

ромятников и др., 2014; Мирошников, Флинт и др., 2020; Ульяновцев, Чаркин, Семин и др., 2021; Швалова, Зарубина, 2022; Ульяновцев, Стрельцова, Чаркин, 2024;

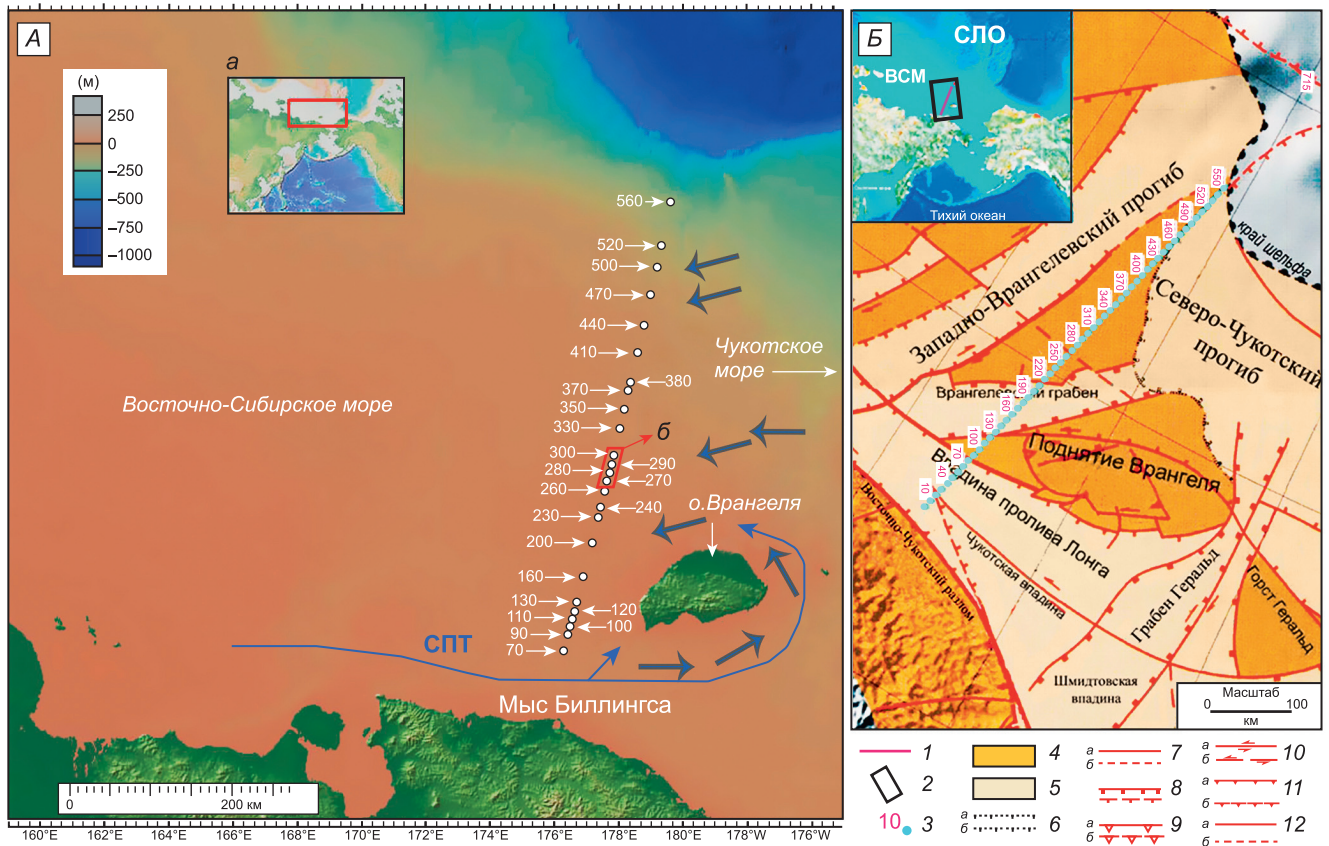


Рис. 1. А. Обзорная карта района исследования с положением пикетов опробования [Шакиров, Сорочинская и др., 2013]: а — расположение меридионального профиля от мыса Биллингса к хребту Менделеева; б — красным выделены станции, где были зарегистрированы повышенные содержания метана [Шакиров, Сорочинская и др., 2013]. Б. Регион исследований. Положение станций отбора донных осадков Восточно-Сибирского моря на карте неотектонических структур, выраженных в рельефе арктического шельфа по [Неотектонические ..., 2004] с изменениями. Синими стрелками показана циркуляция поверхностных течений по данным [Атлас океанов..., 1980; Маслов, 2021]. СПТ — Сибирское прибрежное течение [Маслов, 2021]. Условные обозначения: 1 — профиль работ 2008 г.; 2 — полигон работ; 3 — пикеты опробования; 4 — поднятия и горсты; 5 — впадины, грабены, рампы; 6 — границы достоверные — (а), предполагаемые — (б) (штрихи направлены в сторону впадин). Активные разломы: (главные разломы показаны утолщенными линиями): 7 — достоверные (а), предполагаемые (б); 8 — сбросы (штрихи на опущенном крыле); 9 — взбросы (треугольники на приподнятом крыле) достоверные (а), предполагаемые (б); 10 — сдвиги (стрелками показано направление смещения) достоверные (а), предполагаемые (б); 11 — неустановленного типа (штрихи на опущенном крыле) достоверные (а), предполагаемые (б); 12 — без установленного смещения достоверные (а), предполагаемые (б). СЛО — Северный Ледовитый океан. ВСМ — Восточно-Сибирское море

Rachold, 1999; Viscosi-Shirley, Mammone et al., 2003], Восточно-Сибирское море является одной из наименее изученных акваторий Арктического региона. Геохимические характеристики осадков пока исследованы в недостаточной мере.

Восточно-Сибирское море — окраинное море Северного Ледовитого океана, расположенное между островом Врангеля и Новосибирскими островами. Площадь составляет около 945 тыс. км². Море связано проливами с Чукотским морем и морем Лаптевых. Восточно-Сибирское море лежит на шельфе. Глубина в восточной части моря не превышает 54 м, а в западной и центральной до 20 м, к северу глубины возрастают до 200 м. Западное и центральное побережья плоские, представлены чередующимися термо-абразионными и аккумулятивными участками. Восточная часть характеризуется выходами Чукотского нагорья и скалистыми обрывами, высота которых на о. Врангеля достигает 400 м. На побережье расположены крупные низменности

(Яно-Индибирская, Нижне-Колымская) и заливы (в т.ч. Колымская и Чаунская губы) [Data Access Viewer, 2025].

Гидрологический режим определяется многолетним ледовым покровом, сохраняющимся почти весь год. В восточной части до 10 месяцев в году сохраняется ледовый покров и южная граница льдов проходит совсем близко к берегу. Основные реки — Индибирка, Алазая, Колыма. Соленость варьирует от 5‰ вблизи устьев до 30‰ в открытом море.

Восточная часть Восточно-Сибирского моря характеризуется сложным геологическим строением, контрастным рельефом дна и мозаичным распределением донных отложений различного гранулометрического состава. Основные источники осадочного материала — абразия берегов, размыв дна и речной сток; дополнительный вклад возможен за счет эоловых процессов. На условия седиментации влияние оказывают теплые тихоокеанские воды, поступающие через Берингов пролив и Чукотское море,

а также течения атлантического происхождения из Северного Ледовитого океана [Рябчук, Прищепенко и др., 2020].

Цель настоящей статьи — провести литолого-геохимический анализ состава поверхностного слоя донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря в зоне максимальной разгрузки метана (CH₄) и смежных зон на основе результатов одномерного регрессионного и однофакторного дисперсионного методов статистики; выявить

Таблица 1

Расположение станций поверхностного слоя донных осадков в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря и их гранулометрический состав [Шакиров, Сорочинская и др., 2013]

Зоны шельфа*	Станция	Координаты		Глубина, м	Гранулометрические типы		
		с.ш.	в.д.		Песок, %	Алеврит, %	Пелит, %
1	70	70°34'58"	176°18'11"	43	2,65	50,37	46,97
1	90	70°44'43"	176°25'34"	39	2,44	49,52	48,03
1	100	70°49'59"	176°29'31"	39	1,8	51,53	46,67
1	110	70°54'29"	176°33'32"	38	1,71	54,34	43,96
1	120	70°58'59"	176°37'30"	37	0,9	52,92	46,18
1	130	71°4'14"	176°41'28"	37	0,3	50,11	49,59
1	160	71°19'15"	176°53'24"	31	3,29	55,44	41,27
1	200	71°39'30"	177°9'54"	25	33,09	43,58	23,32
1	230	71°54'31"	177°21'18"	33	4,09	56,39	39,52
1	240	71°59'46"	177°25'48"	34	0,25	45,34	48,49
1	260	72°9'31"	177°33'47"	35	1,24	40,86	48,65
2	270	72°14'46"	177°38'20"	41	0	47,27	50,88
2	280	72°20'11"	177°42'18"	45	0	40,89	59,11
2	290	72°24'32"	177°46'19"	45	0	43,92	56,08
2	300	72°29'47"	177°50'17"	46	0	49,63	50,18
3	330	72°44'47"	178°2'13"	61	0,01	52,34	45,93
3	350	72°55'18"	178°10'12"	54	0,19	51,52	46,47
3	370	73°5'3"	178°18'43"	55	0	51,01	48,72
3	380	73°9'33"	178°22'41"	55	0,17	25,84	72,51
3	410	73°25'18"	178°34'37"	56	0,91	49,34	39,51
3	440	73°39'34"	178°47'10"	63	0,34	51,71	45,34
3	470	73°55'20"	178°59'6"	70	0,08	58,44	39,29
4	500	74°9'35"	179°11'35"	99	0	54,12	45,69
4	520	74°20'5"	179°19'34"	127	0	51,99	47,76
4	560	74°42'36"	179°36'36"	200	0	44,05	55,27

Примечание: Фациальные зоны: 1 — мелководная прибрежная (внутреннего шельфа) со средней глубиной 35,6 м (станции с 70 по 260), 2 — приразломная (среднего шельфа) со средней глубиной 44,3 м и повышенным содержанием CH₄ в осадках (станции с 270 по 300), 3 — относительного глубоководья (внешнего шельфа) со средней глубиной 84 м (станции с 330 по 470), 4 — верхней части континентального склона (станции: 500, 520, 560).

особенности седиментации с помощью таких геохимических индикаторов, как содержание метана (CH₄), органического углерода C_{орг} и распределение отношений V/V+Ni, Mn/Al, Mn/Fe в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря. Исследование направлено на расширение геохимической базы данных для восточного сектора российской Арктики, в частности, на получение строго достоверных данных по границам литолого-фациальных зон.

Материалы и методы исследований. В статье использованы данные по геохимическому и гранулометрическому составу донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря, опубликованные в работе [Шакиров, Сорочинская и др., 2013] (рис. 1; табл. 1, 2). Отбор проб донных осадков осуществлялся с борта научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев» с применением ударной прямооточной трубки (длина 4 м, внутренний диаметр 60 мм). Методы анализа осадков в рейсе и, затем, в лабораторных условиях подробно описаны в статье [Шакиров, Сорочинская и др., 2013].

Перед нами стояли две основных задачи: 1) изучить распределение метана CH₄ (в интервале отбора 0–20 см), C_{орг} (%), Fe (%), некоторых оксидов: MgO (%), CaO (%), Na₂O (%), ряда микроэлементов: Co (г/т), Ni (г/т), Zn(г/т), Pb (г/т) и отношений: Si/Al, V/(V+Ni) в области максимальной концентрации метана (CH₄) и смежных зон в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря на основе однофакторного дисперсионного анализа; 2) с помощью одномерного регрессионного анализа исследовать взаимосвязи пелитовой фракции, содержания органического углерода, в %, суммы Fe и Ti, в %, а также отношений: Si/Al, Ti/Al, Mn/Al, Mn/Fe, V/(V+Ni) с глубиной моря для донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря.

Анализ значений изотопного состава углерода метана и этана, полученных в Восточно-Сибирском море, указывает на их принадлежность к категории газов смешанного происхождения (сочетание термогенного и бактериального генезиса), при этом наблюдается доминирование термогенного компонента [Шакиров, Сорочинская и др., 2013].

Результаты исследования и их обсуждение. На основе анализа данных по среднему содержанию метана — CH₄, в ppm, средним содержаниям оксидов MgO, CaO, Na₂O, Fe, в % и ряда микроэлементов: Co, Ni, Zn, Pb, в г/т, отношений Si/Al, V/(V+Ni), органического углерода, в % по данным [Шакиров, Сорочинская и др., 2013] в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря (рис. 1, А) выделены четыре основные зоны, простирающиеся с юга на север (рис. 1): 1 — прибрежная мелководная зона внутреннего шельфа, прослеживается на профиле по станциям с 70 по 260, частично охватывает пролив Лонга (станция — 70), поднятие Врангеля (90–120), далее Врангельский грабен (станции — 130, 160, 200) со средней глубиной моря — 35,6 м и средним

Таблица 2

Содержание отношений Si/Al, V/(V+Ni), Mn/Al, $C_{\text{орг}}$, оксидов CaO, MgO, Na₂O, а также Cr, Co, Ni, Zn, Pb поверхностного слоя донных осадков в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря [Шакиров, Сорочинская и др., 2013]

Фациальные зоны	Станция	Si/Al	V/(V+Ni)	Mn/Al	Mn/Fe	$C_{\text{орг}}$ %	CH ₄ (0–20 см), %	CaO, %	MgO, %	Na ₂ O, %	Ti, %	Fe, %	Cr, г/г	Co, г/г	Ni, г/г	Zn, г/г	Pb, г/г
1	70	4,63	0,83	0,004	0,008	1,72	3,80	1,46	2,12	3,73	0,34	3,48	67,56	8,4	25,94	90,6	12,72
1	90	4,45	0,84	0,004	0,008	1,58	3,60	1,51	2,17	3,48	0,35	3,71	73,1	10,0	28,05	88,44	18,73
1	100	4,45	0,83	0,004	0,008	1,39	3,00	1,33	2,12	3,46	0,35	3,78	68,09	9,2	28,5	100,7	15,25
1	110	4,45	0,84	0,043	0,077	1,74	9,10	1,46	2,18	3,45	0,34	3,71	67,66	8,7	27,82	99,2	14,51
1	120	4,45	0,84	0,004	0,007	1,65	2,40	1,49	2,15	3,28	0,35	3,90	71,62	9,0	27,96	102,5	14,74
1	130	4,54	0,83	0,004	0,007	1,46	6,60	1,4	2,15	3,32	0,35	3,64	68,71	8,8	27,87	97,3	14,54
1	160	5,11	0,80	0,004	0,008	1,27	3,10	1,19	1,71	3,22	0,32	3,17	59,23	8,1	30,96	79,9	12,86
1	200	8,18	0,84	0,004	0,010	0,5	9,70	1,14	0,9	2,56	0,23	1,62	31,23	4,8	11,59	37,7	9,64
1	230	4,89	0,83	0,004	0,007	1,44	5,90	1,25	1,83	3,51	0,32	3,46	58,8	8,2	27,45	96	13,37
1	240	5,04	0,84	0,004	0,008	1,23	3,70	1,16	1,85	3,68	0,32	3,10	61,85	7,7	26,52	84,8	13,79
1	260	5,32	0,85	0,004	0,007	1,12	5,60	1,11	1,71	3,39	0,29	3,10	54,64	7,4	22,29	84,5	13,25
2	270	3,93	0,86	0,004	0,006	1,62	41,90	1,13	2,5	4,69	0,34	4,59	81,59	9,4	30,91	108,9	17,48
2	280	4,07	0,86	0,004	0,006	2,15	13,00	1,31	2,57	4,66	0,31	4,37	77,78	9,1	29,08	106,3	16,47
2	290	4,08	0,86	0,004	0,006	2,08	4,50	1,27	2,58	4,43	0,34	4,50	82,74	9,6	29,98	111,9	16,23
2	300	4,36	0,86	0,004	0,007	2,06	4,50	1,39	2,43	4,45	0,33	4,17	76,16	9,3	28,93	107,8	16,70
3	330	4,22	0,87	0,006	0,008	2,13	2,60	1,51	2,6	4,66	0,32	5,15	75,29	10,7	29,23	113,6	17,57
3	350	4,36	0,86	0,005	0,007	1,92	3,30	1,59	2,48	4,49	0,32	4,41	73,08	9,9	29,39	106,3	16,80
3	370	4,36	0,82	0,005	0,007	1,94	0,00	1,46	2,31	3,82	0,32	4,59	76,38	10,6	39,88	127,4	19,12
3	380	3,33	0,77	0,007	0,013	1,48	2,60	1,2	2,14	2,86	0,38	4,51	73,26	13,3	45,96	173,4	19,91
3	410	4,68	0,81	0,004	0,008	1,47	3,80	1,44	2,08	3,41	0,32	3,50	66,3	9,8	38,48	103	15,42
3	440	4,59	0,83	0,004	0,008	1,79	6,10	1,51	2,2	3,41	0,32	3,76	72,94	10,6	35,41	112,7	16,57
3	470	4,63	0,78	0,005	0,008	1,76	5,80	1,48	2,21	3,34	0,34	3,79	70,96	11,8	46,6	112,5	15,34
4	500	3,82	0,83	0,041	0,057	2,27	13,80	1,39	3,08	5,46	0,33	4,66	79,19	25,6	45,02	146,8	18,81
4	520	3,83	0,81	0,110	0,159	2,12	3,80	1,47	2,97	5,09	0,32	4,55	74,82	29,4	49,17	160	18,45
4	560	3,41	0,80	0,046	0,068	1,77	4,70	1,42	3,12	6,91	0,32	4,73	82,17	34,0	67,11	185,9	19,78

Таблица 3

Корреляционная матрица Пирсона данных по взаимосвязи Mn, Fe, Al, Cr, V, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Pb для донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря

	Mn	Fe	Al	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Pb
Mn	1,00	0,31	0,15	0,23	0,52	0,80	0,56	–0,01	0,57	0,27	0,36
Fe		1,00	0,64	0,92	0,85	0,52	0,60	0,20	0,78	0,55	0,87
Al			1,00	0,68	0,48	0,32	0,57	0,69	0,74	0,42	0,69
Cr				1,00	0,84	0,46	0,59	0,10	0,71	0,56	0,83
V					1,00	0,80	0,82	0,03	0,85	0,60	0,83
Co						1,00	0,86	0,09	0,82	0,47	0,62
Ni							1,00	0,28	0,90	0,49	0,72
Cu								1,00	0,47	0,12	0,37
Zn									1,00	0,56	0,84
Ag										1,00	0,63
Pb											1,00

Примечание: Курсивом показаны значения коэффициентов корреляции с уровнем достоверности 95%.

содержанием CH₄ — 5,14 ppm; 2 — приразломная зона среднего шельфа, распространена с юга на север и расположена поблизости с предполагаемым разломом (станции с 270 по 300) со средней глубиной моря 44,3 м и средним содержанием CH₄ (в интервале отбора от 0 до 20 см) — 15,98 ppm; 3 — относительно глубоководная зона внешнего шельфа (станции с 330 по 470) распространена вдоль Западно-Врангельского прогиба, имеет среднюю глубину 84 м, со средним содержанием метана (CH₄) — 3,46 ppm; 4 — верхняя часть континентального склона со средней глубиной 142 м и средним содержанием CH₄ 7,43 ppm (рис. 1).

Результаты корреляционного анализа Пирсона в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря (для 4-х фациальных зон) позволили выявить сильные положительные корреляции Mn с V ($r=+0,52$), Co ($r=+0,8$), Ni ($r=+0,56$) и Zn ($r=+0,57$) (табл. 3), что указывает на их совместную взаимосвязь в процессе диагенеза. Марганец легко реагирует на изменения окислительно-вос-

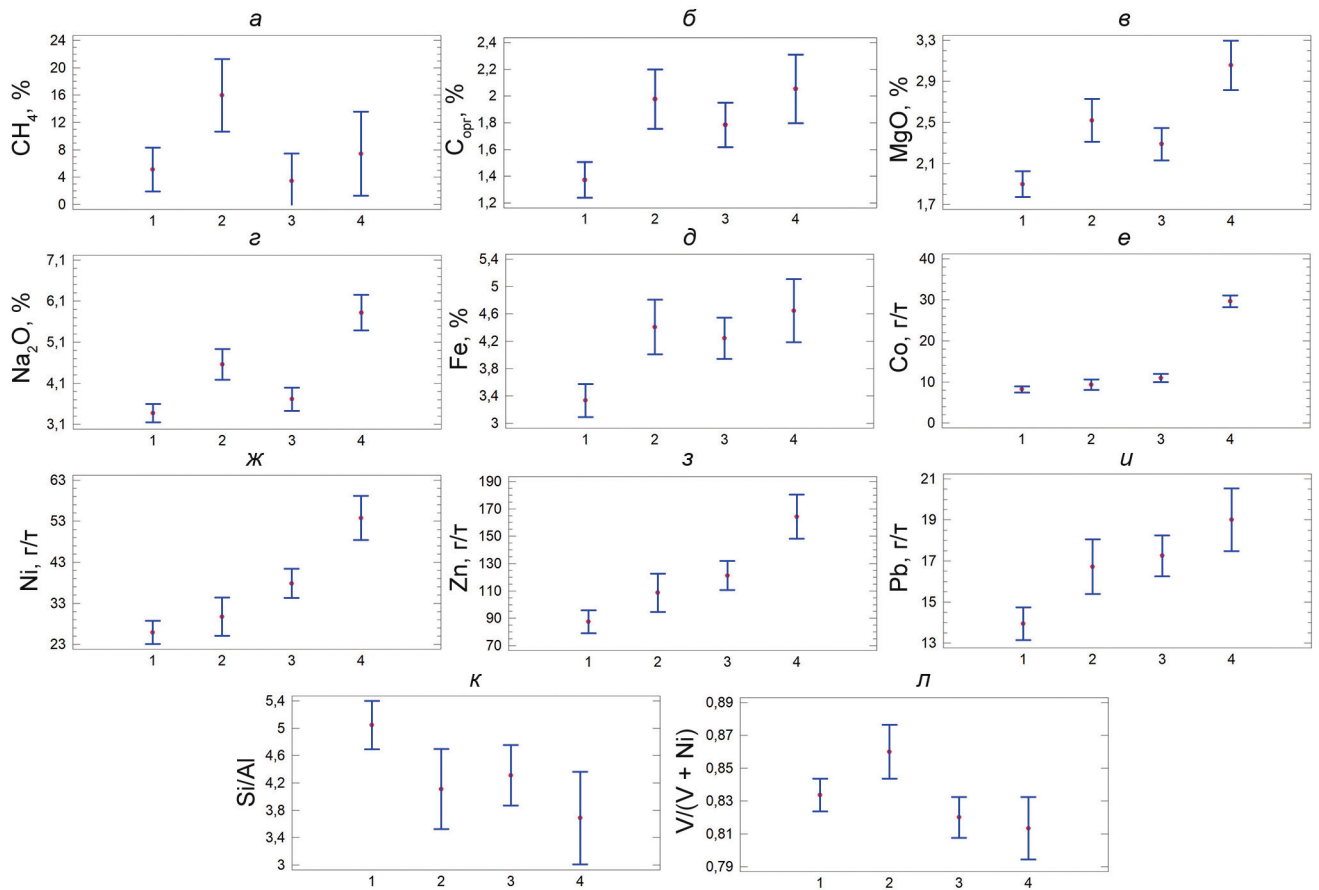


Рис. 2. Средние и 95% доверительные интервалы распределения: а — CH₄, б — органического углерода (C_{орг}), в — MgO, г — Na₂O, д — Fe, е — Co, ж — Ni, з — Zn, и — Pb, к — Si/Al, л — V/(V+Ni) в донных осадках четырех выделенных зон шельфа юго-восточной части Восточно-Сибирского моря: 1 — мелководная прибрежная зона внутреннего шельфа; 2 — приразломная зона среднего шельфа (с повышенным содержанием метана (CH₄) в осадках); 3 — зона относительного глубоководья внешнего шельфа; 4 — зона верхней части континентального склона

становительных условий. В ходе транспортировки и осаднения из водной толщи происходят сорбция и соосаждение Co, Ni, Zn и V на поверхности оксидно-гидроксидных фаз Mn, что характерно для шельфовых и склоновых обстановок Арктики. Особенно показательной является корреляция Mn–Co ($r=+0,80$), свидетельствующая о связывании кобальта преимущественно с марганцевыми фазами. Это указывает на активные процессы диагенетической миграции металлов в пределах восстановительно-окислительных барьеров, характерных для зон флюидного воздействия и повышенной биогеохимической активности. Установлены сильные положительные корреляционные связи Fe с Al ($r=+0,64$), Cr ($r=+0,92$), V ($r=+0,85$), Co ($r=+0,52$) и Ni ($r=+0,60$), что отражает роль железа, как главного носителя терригенного и глинистого материала. Высокая корреляция Fe с Al и Cr указывает на их совместную локализацию в алюмосиликатной матрице осадков, тогда как связи Fe с V, Co и Ni свидетельствуют о дополнительном контроле со стороны редокс-чувствительных фаз железа и органо-минеральных комплексов.

Дисперсионный анализ позволяет с достаточно высокой точностью диагностировать фациальную

природу осадков с учетом их геохимического состава [Сыромятников, Габдуллин, 2022_{а,б}]. В процессе проведения однофакторного дисперсионного анализа (табл. 4; 5; рис. 2, а-л) были проанализированы распределения органического углерода C_{орг} в %, некоторых оксидов MgO, Na₂O, Fe, в %, ряда микроэлементов Co, Ni, Zn, Pb, в г/т, а также отношений Si/Al, V/(V+Ni) в пределах выделенных зон для донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря.

Установлено (табл. 4, 5; рис. 2, а), что средние содержания метана (CH₄, %) в мелководной прибрежной зоне (внутреннего шельфа) составляют 5,14% (стандартная ошибка (SE) равна 2,18), возрастают в приразломной зоне среднего шельфа до 15,98% (SE=3,61), резко уменьшаясь в относительно более глубоководной зоне внешнего шельфа до 3,46% (SE=2,73) и затем вновь увеличивается в зоне верхней части континентального склона до 7,43% (SE=4,17). Однако, достоверность распределения CH₄ не доказана статистически, так как P-значение более 0,05, что вероятно связано с тем, что 4-я зона, несмотря на контрастность геохимического состава по сравнению с остальными тремя зонами, прослеживается только по трем точкам. Таким об-

Таблица 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа по распределению CH_4 (ppm); $C_{\text{орг}}$ MgO, CaO, Na_2O , Fe (мас.%), Co, Ni, Zn, Pb (г/т), отношения Si/Al, V/(V+Ni) в изученных донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря

Параметры	Источник	Сумма квадратов, SS	Степени свободы, Df	Средние квадраты	F-отношение	P-значение (p)
CH_4 , г/т	Между группами	446,2	3	178,7	2,86	0,06
	Внутри групп	1093,4	21	52,07		
	Общая	1539,65	24			
$C_{\text{орг}}$ %	Между группами	1,88	3	0,63	6,92	0,002
	Внутри групп	1,90	21	0,09		
	Общая	3,79	24			
MgO, %	Между группами	3,61	3	1,21	14,92	>0,01
	Внутри групп	1,69	21	0,08		
	Общая	5,30	24			
Na_2O , %	Между группами	16,05	3	5,34	20,69	>0,01
	Внутри групп	5,43	21	0,26		
	Общая	21,48	24			
Fe, %	Между группами	7,05	3	2,35	8,02	>0,01
	Внутри групп	6,16	21	0,29		
	Общая	13,21	24			
Co, г/т	Между группами	1126,72	3	375,58	126,13	>0,01
	Внутри групп	62,53	21	2,98		
	Общая	1189,25	24			
Ni, г/т	Между группами	2054,08	3	684,69	16,99	>0,01
	Внутри групп	846,27	21	40,3		
	Общая	2900,35	24			
Zn, г/т	Между группами	15321,5	3	5107,16	14,11	>0,01
	Внутри групп	7599,2	21	361,87		
	Общая	22920,70	24			
Pb, г/т	Между группами	86,48	3	28,83	8,89	>0,01
	Внутри групп	68,11	21	3,24		
	Общая	154,59	24			
Si/Al	Между группами	6,11	3	2,04	3,22	0,0434
	Внутри групп	13,28	21	0,63		
	Общая	19,39	24			
V/(V+Ni)	Между группами	0,005	3	0,0017	3,47	0,034
	Внутри групп	0,0107	21	0,0005		
	Общая	0,0157	24			

Таблица 5

Распределение CH_4 (ppm); $C_{\text{орг}}$ MgO, CaO, Na_2O , Fe (мас.%), Co, Ni, Zn, Pb (г/т), отношения Si/Al, V/(V+Ni) в изученных донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря (составлено авторами на основе данных [Шакиров, Сорочинская и др., 2013])

Параметры	Зоны ^а шельфа	Количество образцов (n)	Среднее значение	Стандартная ошибка (SE)	Минимальное значение	Максимальное значение	95% доверительный интервал для среднего ^б	
							Нижняя граница	Верхняя граница
CH_4 , ppm	1	11	5,14	2,18	2,4	9,7	1,94	8,34
	2	4	15,98	3,61	4,5	41,9	10,67	21,28
	3	7	3,46	2,73	0	6,1	-0,55	7,47
	4	3	7,43	4,17	3,8	13,8	1,31	13,56
	Общее	25	6,68	-	0	41,9		
$C_{\text{орг}}$ %	1	11	1,37	0,09	0,50	1,74	1,24	1,51
	2	4	1,98	0,15	1,62	2,15	1,76	2,20
	3	7	1,78	0,11	1,47	2,13	1,62	1,95
	4	3	2,05	0,17	1,77	2,27	1,797	2,31
	Общее	25	1,67	-	0,50	2,27		

Параметры	Зоны ^а шельфа	Количество образцов (n)	Среднее значение	Стандартная ошибка (SE)	Минимальное значение	Максимальное значение	95% доверительный интервал для среднего ^б	
							Нижняя граница	Верхняя граница
MgO, %	1	11	1,90	0,09	0,9	2,18	1,77	2,03
	2	4	2,52	0,14	2,43	2,58	2,31	2,73
	3	7	2,29	0,11	2,08	2,6	2,13	2,45
	4	3	3,06	0,16	2,97	3,12	2,82	3,30
	Общее	25	2,25	–	0,9	3,12		
Na ₂ O, %	1	11	3,37	0,15	2,56	3,73	3,15	3,596
	2	4	4,56	0,25	4,43	4,69	4,18	4,93
	3	7	3,71	0,19	2,86	4,66	3,43	3,996
	4	3	5,82	0,29	5,09	6,91	5,39	6,25
	Общее	25	3,95	–	2,56	6,91		
Fe, %	1	11	3,33	0,16	1,62	3,90	3,09	3,57
	2	4	4,41	0,27	4,17	4,59	4,01	4,81
	3	7	4,24	0,21	3,50	5,15	3,94	4,55
	4	3	4,65	0,31	4,55	4,73	4,19	5,11
	Общее	25	3,92	–	1,62	5,15		
Co, г/т	1	11	8,20	0,52	4,81	9,95	7,44	8,97
	2	4	9,34	0,86	9,14	9,58	4,93	10,61
	3	7	10,96	0,65	9,81	13,26	13,78	11,92
	4	3	29,64	0,996	25,55	34,02		
	Общее	25	11,73	–	4,81	34,02		
Ni, г/т	1	11	25,91	1,91	11,59	30,96	23,09	28,72
	2	4	29,73	3,17	28,93	30,91	25,06	34,39
	3	7	37,85	2,40	29,23	46,6	34,32	41,38
	4	3	53,77	3,67	45,02	67,11	48,38	59,16
	Общее	25	33,20	–	11,59	67,11		
Zn, г/т	1	11	87,42	5,73	37,7	102,5	78,98	95,86
	2	4	108,73	9,51	106,3	111,9	94,74	122,71
	3	7	121,27	7,19	103,0	173,4	110,7	131,84
	4	3	164,23	10,98	146,8	185,9	148,08	180,34
	Общее	25	109,53	–	37,7	185,9		
Pb, г/т	1	11	13,95	0,54	9,64	18,73	13,15	14,74
	2	4	16,72	0,90	16,23	17,48	15,4	18,04
	3	7	17,25	0,68	15,34	19,91	16,25	18,25
	4	3	19,01	1,04	9,64	19,78	17,48	20,54
	Общее	25	15,92	–	9,64	19,91		
Si/Al	1	11	5,05	0,24	4,45	8,18	4,69	5,40
	2	4	4,11	0,40	3,93	4,36	3,52	4,70
	3	7	4,31	0,30	3,33	4,68	3,89	4,75
	4	3	3,69	0,46	3,41	3,83	3,01	4,36
	Общее	25	4,53	–	3,33	8,18		
V/(V+Ni)	1	11	0,83	0,007	0,8	0,85	0,82	0,84
	2	4	0,86	0,01	0,86	0,86	0,84	0,88
	3	7	0,82	0,009	0,77	0,87	0,81	0,83
	4	3	0,81	0,01	0,8	0,83	0,79	0,83
	Общее	25	0,83	–	0,77	0,87		

Примечание: ^а — зоны шельфа (табл. 1): 1 — мелководная прибрежная (внутреннего шельфа) со средней глубиной 35, 6 м (станции с 70 по 260), 2 — приразломная (среднего шельфа) со средней глубиной 44,3 м и повышенным содержанием CH₄ в осадках (станции с 270 по 300), 3 — относительного глубоководья (внешнего шельфа) со средней глубиной 84 м (станции с 330 по 470); 4 — верхней части континентального склона со средней глубиной 142 м (станции 500, 520, 560). ^б — при большом числе выборок из генеральной совокупности 95% средних значений этих выборок попадут в интервал, определяемый нижней и верхней границами.

разом, отсутствие статистической значимости не опровергает геологическую интерпретацию, а отражает специфику газогеохимических параметров в морских осадках, которые редко демонстрируют нормальное распределение.

Максимальное среднее значение органического углерода ($C_{\text{орг}}$) наблюдается в верхней части континентального склона (2,05%; SE=0,17) и приразломной зоне (1,98%; SE=0,15), несколько меньше в зоне внешнего шельфа (1,78%; SE=0,11) и заметно ниже в прибрежно-морской зоне внутреннего шельфа (1,37%; SE=0,09) (табл. 4, 5; рис. 2, б). *P*-значение меньше 0,01 свидетельствует о распределении органического углерода в пределах выделенных зон с уровнем достоверности 95%. Максимальные значения, зафиксированные в верхней части континентального склона, интерпретируются, как результат: 1) повышенной биопродуктивности и лучшей сохранности органического вещества; 2) замедленной гидродинамики осадконакопления; 3) восстановительных условий, подтвержденных значениями V/(V+Ni) (табл. 2).

Низкие стандартные ошибки свидетельствуют об относительной однородности условий аккумуляции органического вещества в пределах каждой из выделенных зон.

Содержание MgO в донных осадках демонстрирует тенденцию увеличения от прибрежной зоны внутреннего шельфа (1,90%; SE = 0,09) к приразломной зоне среднего шельфа (2,52%; SE = 0,14) и зоне внешнего шельфа (2,29%; SE = 0,11), достигая максимальных значений в зоне верхней части континентального склона (3,06%; SE = 0,16). Статистически значимая разница средних значений, подтвержденная однофакторным дисперсионным анализом, указывает на систематический характер распределения Mg. Повышение MgO в направлении от мелководных к более глубоководным зонам интерпретируется авторами, как результат увеличения доли тонкодисперсной глинистой компоненты (смектит, хлорит, иллит-смектитовые ассоциации), обогащенной Mg. Относительно низкие стандартные ошибки свидетельствуют об однородности условий накопления Mg-содержащих фаз в пределах каждой зоны и подтверждают устойчивость выявленной тенденции (табл. 4, 5; рис. 2, в).

Содержание Na_2O демонстрирует выраженную зональную изменчивость и является одним из наиболее чувствительных индикаторов изменения минерального состава осадков. В прибрежной зоне внутреннего шельфа среднее содержание Na_2O составляет 3,37% (SE = 0,15), увеличиваясь в приразломной зоне среднего шельфа до 4,56% (SE = 0,25). В зоне внешнего шельфа отмечается резкое снижение Na_2O до 3,71% (SE = 0,19), после чего в зоне верхней части континентального склона наблюдается значительный рост до 5,82% (SE = 0,29). Повышенные содержания Na_2O в приразломной зоне и зоне континентального склона рассматриваются

нами как следствие возможного увеличения доли натрийсодержащих полевых шпатов и/или морских глинистых минералов, а также возможного участия морской воды и флюидов в процессах постседиментационных изменений. Резкое снижение Na_2O во внешней зоне шельфа может отражать вымывание натрийсодержащих минералов в условиях более активной циркуляции водной среды, либо смену минерального состава в сторону Al- и Fe-богатых глин. Достаточно высокие стандартные ошибки для Na_2O указывают на чувствительность Na к локальным минералогическим вариациям и диагенетическим процессам (табл. 4, 5; рис. 2, г).

Содержание Fe возрастает от прибрежной зоны внутреннего шельфа (3,33%; SE = 0,16) к приразломной зоне среднего шельфа (4,41%; SE = 0,28), несколько уменьшается во внешней зоне шельфа (4,24%; SE = 0,21) и вновь увеличивается в зоне верхней части континентального склона (4,65%; SE = 0,31) (табл. 4, 5; рис. 2, д). Подобное распределение Fe отражает совокупное влияние терригенного поступления, редокс-условий в водной толще и диагенетических процессов. Повышенные содержания Fe в приразломной зоне связаны с аккумуляцией Fe в восстановительных условиях и активной фиксацией его в виде сульфидных и оксидно-гидроксидных фаз. Рост Fe в зоне континентального склона может быть обусловлен вторичным накоплением железа в условиях замедленного осадконакопления. Умеренные значения стандартных ошибок свидетельствуют о сочетании фонового накопления Fe и локальных зон обогащения, особенно в зонах тектонического и флюидного контроля.

Средние содержания Co демонстрируют резкое его увеличение: от 8,2 г/т (SE = 0,52) в прибрежной зоне внутреннего шельфа до 9,34 г/т (SE = 0,86) в приразломной зоне среднего шельфа, 10,96 г/т (SE = 0,65) во внешней зоне шельфа и экстремально высоких значений в зоне верхней части континентального склона — 29,64 г/т (SE = 1,00) (табл. 4, 5; рис. 2, е). Эти данные свидетельствуют о наличии дополнительного механизма концентрации Co в глубоководной части профиля. Высокие содержания Co в зоне континентального склона интерпретируются как результат его накопления в восстановительных условиях в ассоциации главным образом с марганцевыми фазами (табл. 3), а также с диагенетическими сульфидами.

Ni демонстрирует сходную с Co тенденцию, увеличиваясь от 25,91 г/т (SE = 1,91) в прибрежной зоне до 53,77 г/т (SE = 3,67) в зоне верхней части континентального склона (табл. 4, 5; рис. 2, ж). Устойчивое возрастание содержания Ni указывает на возрастающую роль окси-гидроксидных и сульфидных фаз в более глубоководных и восстановительных условиях. Высокие стандартные ошибки для Ni отражают многокомпонентность его носителей и сильную зависимость от локальных диагенетических условий. Ni активно ассоциируется также и с органическим

веществом, что подтверждается его ростом в зонах с повышенными значениями $C_{\text{орг}}$ и высокими величинами отношения $V/(V+Ni)$ (табл. 2).

Следует отметить, что Co и Ni могут быть связаны с отличающимися между собой фазами (сульфиды, органика, глинистые минералы), различно распределенными в пространстве.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа демонстрируют статистически значимую зональную изменчивость содержания Zn в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря. Средние концентрации Zn последовательно возрастают от прибрежной зоны внутреннего шельфа (87,42 г/т; SE = 5,73) к зоне верхней части континентального склона (164,23 г/т; SE = 10,98) (табл. 4, 5; рис. 2, з). Минимальные значения Zn в прибрежной зоне отражают условия интенсивной гидродинамики и периодической оксидации, неблагоприятные для его фиксации. Повышение содержания Zn связано с усилением относительной роли терригенного глинистого вещества (табл. 3). Относительно высокие стандартные ошибки указывают на пространственную неоднородность распределения Zn.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показывают статистически значимое увеличение среднего содержания Pb от прибрежной зоны внутреннего шельфа (13,95 г/т; SE = 0,54) к зоне верхней части континентального склона (19,01 г/т; SE = 1,04) (табл. 4, 5; рис. 2, и). Такой тренд отражает рост роли тонкодисперсных фракций, особенно содержащихся в них железистых окси-гидроксидов. Минимальные значения Pb в прибрежной зоне обусловлены высокой гидродинамической активностью и его слабой фиксацией в осадках, тогда как повышенные концентрации в глубоководных зонах связаны с его накоплением в восстановительных условиях, преимущественно в составе железистых и сульфидных фаз. Низкие стандартные ошибки указывают на относительную однородность распределения Pb в пределах выделенных зон.

Отношение Si/Al является индикатором терригенности и изменения литологического состава осадков. В прибрежно-морской зоне внутреннего шельфа значение Si/Al максимальное — 5,05, тогда как в приразломной зоне (2) и внешней зоне шельфа (3) — оно практически одинаковое: 4,11 и 4,12 (табл. 4, 5; рис. 2, к). В зоне верхней части континентального склона (4) отношение Si/Al уменьшается до 3,69 (SE = 0,46) (табл. 3, 4; рис. 2, л). Эти данные указывают на большее поступление кремнеземистого материала (возможно, песчаной фракции) в прибрежной зоне. Уменьшение Si/Al может свидетельствовать о возрастающем содержании глинистых компонентов на более удаленных от берега участках шельфа.

Отношение $V/(V+Ni)$ используется как индикатор редокс-условий в осадках: значения выше 0,80 характерны для анокисической среды [Маслов, Ишерская, 2004; Hatch, Leventhal, 1992]. Все зоны характеризуются значениями выше 0,80, при этом

наибольшее значение отмечено во 2-й зоне (0,86), что может быть дополнительным признаком восстановительных условий в зоне флюидного влияния (табл. 4, 5; рис. 2, л). При этом в 4-й зоне верхней части континентального склона отношение $V/(V+Ni)$ уменьшается до 0,81 (SE = 0,01) за счет относительного обогащения Ni по сравнению с V, что подтверждается резким ростом средних концентраций Ni в этой зоне. Замедленное осадконакопление и высокая сохранность органики также приводят к увеличению доли Ni в сумме (V+Ni) и, как следствие, к снижению индекса $V/(V+Ni)$.

Высокие значения стандартных ошибок (SE) и перекрывающиеся 95% доверительные интервалы между зонами по ряду показателей (например, CH_4 , Co, Zn, Na_2O) обусловлены как относительно небольшим количеством наблюдений в выборках, так и, прежде всего, внутренней геохимической неоднородностью самих зон. Пространственная изменчивость геохимических параметров, обусловленная различиями в осадконакоплении, флюидодинамике, литологии и влиянии локальной тектоники (неотектонические разломы) [Шакиров, Сорочинская и др., 2013], приводит к высокой дисперсии данных, что снижает статистическую значимость различий по отдельным признакам. Тем не менее, даже при наличии пересечения интервалов, большая разница в средних значениях и их геологическая интерпретация позволяют уверенно говорить о неодинаковых условиях в пределах выделенных зон шельфа юго-восточной части Восточно-Сибирского моря.

Вероятная связь 2-ой приразломной зоны среднего шельфа с активным неотектоническим разломом усиливает гипотезу о наличии глубинного источника метана, в большей степени термогенного [Шакиров, Сорочинская и др., 2013] и в меньшей степени бактериального происхождения.

В целях выявления пространственной зависимости между глубиной моря и ключевыми геохимическими и гранулометрическими показателями донных осадков Восточно-Сибирского моря нами проведен одномерный регрессионный анализ по 25 пробам для четырех рассматриваемых зон.

Установлена статистически значимая положительная связь между глубиной и содержанием глинистой фракции ($P = 1/(0,015 + 0,307/D)$, P -значение = 0,0006, $R^2 = 67,09\%$) (табл. 6; рис. 3, а). С увеличением глубины наблюдается рост доли тонкодисперсного материала, что отражает закономерности седиментации: в условиях пониженной гидродинамики (характерных для большей глубины) осаждаются более мелкие частицы. Высокая степень детерминации указывает на устойчивость этой зависимости и подтверждает, что глубина является одним из главных факторов, контролирующих гранулометрический состав осадков.

Регрессионный анализ выявил отрицательную связь между глубиной и отношением Si/Al ($Si/Al = 1/(0,30 - 3,33/D)$, P -значение = 0,0006,

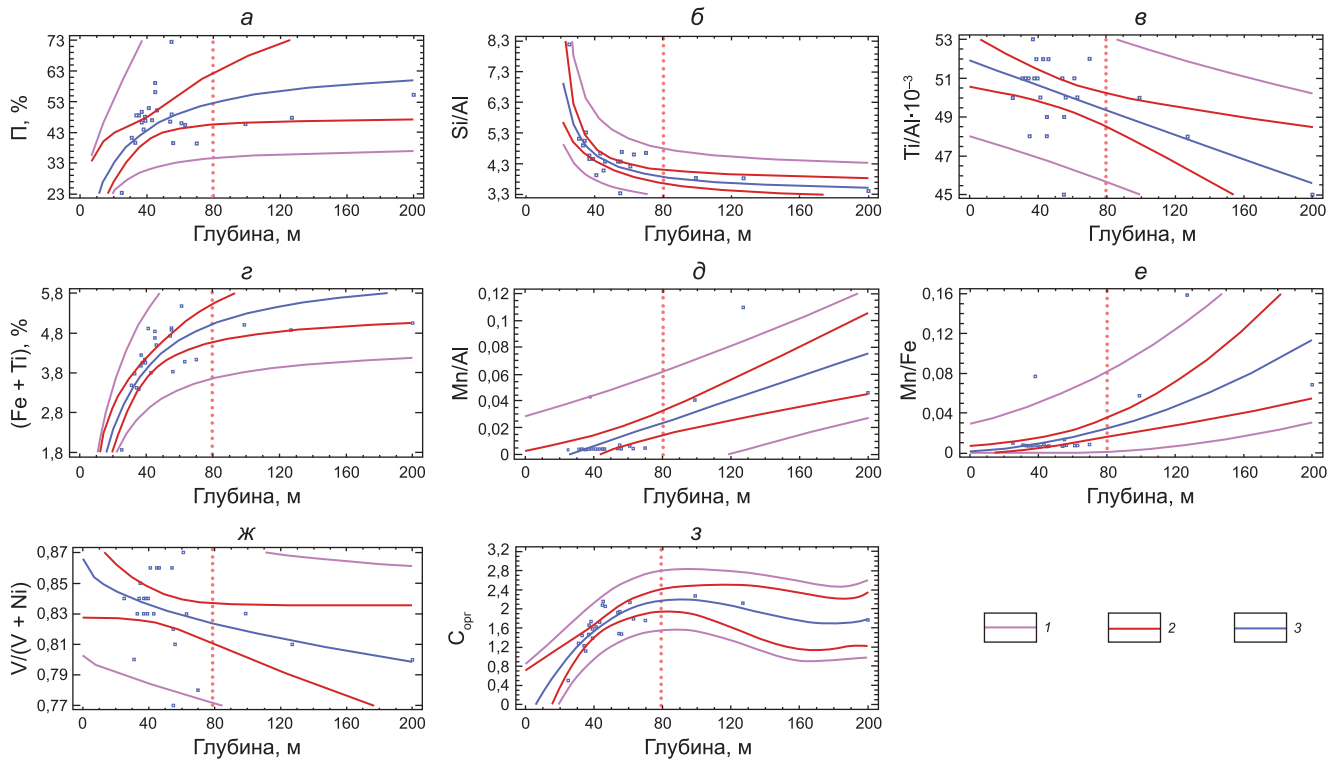


Рис. 3. Результаты одномерного регрессионного анализа для донных осадков Восточно-Сибирского моря взаимосвязи глубины: а — прямой нелинейной взаимосвязи глубины моря и пелита; б — обратной нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения Si/Al; в — обратной нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения Ti/Al; г — прямой нелинейной взаимосвязи глубины моря и суммы Fe и Ti; д — прямой нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения Mn/Al; е — прямой нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения Mn/Fe; ж — обратной нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения V/(V+Ni); з — полиномиальной взаимосвязи глубины моря и содержание $C_{\text{орг}}$; 1 — доверительный интервал, соответствующий предсказанному значению регрессии; 2 — доверительный интервал для среднего значения предсказанных значений регрессии; 3 — линия регрессии

Таблица 6

Уравнения регрессии по взаимосвязи пелитовой фракции (П), содержания органического углерода, в %, суммы Fe и Ti, в %, а также отношений: Si/Al, Ti/Al, Mn/Al, Mn/Fe, V/(V+Ni) с глубиной для донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря

Уравнение регрессии	Количество исследуемых образцов	Коэффициент корреляции, R, %	Коэффициент детерминации, R ² , %	Стандартная ошибка регрессии	p-value
$\text{П} = 1/(0,015 + 0,307/D)$	25	0,5	67,09	0,02	0,0006
$\text{Si/Al} = 1/(0,30 - 3,33/D)$	25	-0,76	67,09	0,02	0,0006
$\text{Ti/Al} = (0,228 - 0,0000716 \cdot D)^2$	25	-0,57	62,06	0,02	0,001
$\text{Fe+Ti} = \exp(1,87 - 20,05/D)$	25	-0,74	55,02	0,2	0,000
$\text{Mn/Al} = -0,01 + 0,00043 \cdot D$	25	0,7	45,46	0,02	0,000
$\text{Mn/Fe} = (0,036 + 0,0015 \cdot D)^2$	25	0,7	46,96	0,06	0,000
$\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) = 0,87 - 0,0048 \cdot \sqrt{D}$	25	-0,04	13,62	0,02	0,07
$\text{C}_{\text{орг}} = 2,47 - 36,71/D$	25	-0,7	53,96	0,3	0,000

Примечание: П — содержание пелитовой фракции (мас.%); D — глубина моря, в м.

$R^2 = 67,09\%$, $R = -0,76$) (табл. 6; рис. 3, б), что свидетельствует о снижении содержания кремнеземистого (существенно кварцевого) материала с удалением от береговой зоны. Это согласуется с литологическим анализом: в прибрежной зоне оседает песчаная и алевритовая фракция, обогащенная кварцем, тогда как в более глубоких частях бассейна преобладают глинистые осадки, бедные Si. В то же время оксиды Al в исследованных осадках не установлены.

Отношение Ti/Al ($\text{Ti/Al} = (0,228 - 0,0000716 \cdot D)^2$, P -значение = 0,001, $R^2 = 62,06\%$) (табл. 6; рис. 3, в) также демонстрирует статистически значимую отрицательную зависимость от глубины, что отражает преимущественное осаждение титансодержащих тяжелых минералов (рутил, ильменит, сфен) в более прибрежных зонах с крупнозернистыми осадками. Это отношение может быть использовано как дополнительный показатель гранулометрического состава и гидродинамического режима осадконакопления.

Увеличение суммы (Fe + Ti), с ростом глубины (уравнение: $\text{Fe+Ti} = \exp(1,87 - 20,05/D)$, P -значение < 0,001, $R^2 = 55,02\%$), связано с увеличением доли глинистой фракции в зоне внешнего шельфа и верхней части континентального склона, с которой связано Fe.

Положительная корреляция между глубиной и отношениями Mn/Al ($\text{Mn/Al} = -0,01 +$

0,00043·D, P -значение $< 0,001$, $R^2 = 45,46\%$) (табл. 6; рис. 3, д) и Mn/Fe (Mn/Fe = $(0,036 + 0,0015 \cdot D)^2$, P -значение $< 0,001$, $R^2 = 46,96\%$) (табл. 6; рис. 3, е) указывает на преобладание окислительных условий по мере увеличения глубины. В поверхностных слоях донных осадков марганец легко мобилизуется в восстановительной среде, тогда как в более окислительной — образует устойчивые оксиды. Таким образом, рост этих соотношений с глубиной может отражать более окислительные условия в придонных слоях водной толщи и пониженные скорости седиментации. Следует отметить, что в приразломной зоне (2) отношение Mn/Al $< 0,005$, что говорит о наличии здесь восстановительных условий седиментации [Эдер, 2020; Hofmann, Ricken et al., 1999].

Отношение $V/(V+Ni)$ слабо зависит от глубины ($V/(V+Ni) = 0,87 - 0,0048 \cdot D$, P -значение = 0,07, $R^2 = 13,62\%$) (табл. 6; рис. 3, ж), что может свидетельствовать о влиянии локальных факторов (органическая продуктивность, флюидоразряды), преобладающих над фактором глубины. При этом общие значения $V/(V+Ni)$ во всех зонах шельфа превышают 0,80, что характерно для аноксических или слабоокислительных условий, типичных для современной седиментации в Восточно-Сибирском море.

Взаимосвязь органического углерода с глубиной выражается уравнением полиномиальной регрессии третьей степени ($C_{орг} = -0,39 + 0,069 \cdot D - 0,0006 \cdot D^2 + 14 \cdot 10^{-5} \cdot D^3$; где D — глубина моря, в м; $R^2 = 57,95\%$, $SE = 0,3$) (табл. 6; рис. 3, з). Полученная кривая демонстрирует сложную зависимость $C_{орг}$ от глубины: в движении от береговой линии наблюдается увеличение содержания органического вещества с глубиной до отметки 80 м, далее содержание $C_{орг}$ начинает постепенно снижаться до глубины 180 м и до 200 м постепенно увеличивается.

Изменения содержания $C_{орг}$ на мелководье, в приразломной зоне и отчасти в глубинной зоне внешнего шельфа (до 80 м) обусловлены активным поступлением терригенного органического вещества, в том числе за счет рек Колыма, Индигирка и других более мелких рек, а также снижением содержания крупных гранулометрических фракций в северном направлении. Уменьшение концентраций на глубинах 80–180 м связано с ослаблением терригенного потока. Повторный рост $C_{орг}$ на глубинах около 200 м, вероятно, обусловлен осаждением органического вещества в зоне ослабления гидродинамической активности, а также существенным возрастанием относительной роли планктоногенного ОВ [Ветров и др., 2008; Дударев и др., 2025].

Результаты однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) по ключевым геохимическим показателям между 4-мя зонами показали, что различия по содержанию $C_{орг}$, Si/Al, Co, Ni, Zn и Ti/Al являются статистически значимыми (P -значение $< 0,05$), что подтверждает различие геохимического состава донных осадков в пределах исследуемых зон и условий седиментации.

Таким образом, глубина моря оказывает важное влияние на гранулометрический и геохимический состав донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского шельфа. Полученные регрессионные зависимости позволяют обосновать пространственную дифференциацию осадконакопления в пределах изученных зон, а также влияние редокс-условий. Обнаруженные зависимости могут быть использованы в качестве критериев при интерпретации палеоусловий седиментации.

С помощью одномерного регрессионного анализа удалось установить на более высоком уровне фаціальную дифференциацию в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря с выделением шельфовой зоны (до глубины 80 м) и зоны континентального склона (табл. 6; рис. 3).

Эта дифференциация подтверждается геохимическими данными по распределению Hg [Иванов и др., 2025], Li, Sc, Ga, $\Sigma P3Э$, Ni, Co, Ti в поверхностном слое донных осадков восточной Арктики [Аксентов, Саттарова и др., 2025].

Заключение. На основании комплексного литолого-геохимического исследования донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря установлены выраженные пространственные различия в геохимическом составе и осадконакоплении, позволившие выделить четыре литолого-фаціальные зоны. 1 — мелководная прибрежная зона внутреннего шельфа. Характеризуется преобладанием алевритово-песчаных фракций, высокими отношениями Si/Al и Ti/Al, низким содержанием $C_{орг}$ и слабоокислительными условиями седиментации (повышенные значения Mn/Fe и Mn/Al). Осадки обеднены органикой, характерен активный гидродинамический режим, способствующий выносу мелкодисперсного материала.

Зона 2 — приразломная зона среднего шельфа. Здесь выявлены максимальные значения содержания $C_{орг}$ (до 2,2%). Наблюдается повышенное содержание CH_4 и наличие индикаторов восстановительной среды осадконакопления (повышенные значения $V/(V+Ni) > 0,8$). Терригенный поток умеренный, показатель Ti/Al снижен, а суммы Fe+Ti повышенные. Вероятно, зона связана с влиянием тектонических структур и анаэробным режимом.

Зона 3 — относительно глубоководная (внешнего шельфа); здесь преобладают глинистые осадки, характерны низкие значения Si/Al и Ti/Al, повышенные Mn/Fe и Mn/Al, что свидетельствует о более окислительных условиях. Наблюдаются колебания в содержании $C_{орг}$, обусловленные снижением интенсивности поставки терригенного органического вещества в пелагическом направлении и возрастанием первичной продукции за счет планктоногенного органического вещества.

Зона 4 — зона верхней части континентального склона — характеризуется максимальными значениями MgO, Na_2O , Fe, Co, Ni, Zn и Pb, Mn/Fe, а также повышенными концентрациями планктоногенного

органического углерода вследствие влияния теплых и более соленых тихоокеанских вод, проникающих через Берингов пролив и Чукотское море. Значения $V/(V+Ni)$ остаются выше 0,80, что указывает на сохранение восстановительных условий, хотя и менее выраженных, чем во 2-ой приразломной зоне среднего шельфа. Низкие значения Si/Al свидетельствуют о преобладании тонкодисперсного глинистого и органо-минерального материала и замедленном осадконакоплении. Повышенные стандартные ошибки по ряду микроэлементов указывают на геохимическую неоднородность и наличие локальных зон концентрации, характерных для склоновых обстановок. В целом зона верхней части континентального склона рассматривается как область эффективного захоронения органического вещества и аккумуляции редокс-чувствительных элементов.

Дисперсионный анализ выявил статистически значимые различия между зонами по ключевым геохимическим индикаторам (CH_4 , C_{org} , Ti/Al , Si/Al , Co , Ni , Zn), подтверждая достоверность геохимического районирования.

Регрессионный анализ подтвердил существенную зависимость ряда геохимических показателей от глубины: содержание пелитовой фракции, C_{org} , отношения Si/Al , Ti/Al , Mn/Al , Mn/Fe демонстрируют высокие коэффициенты детерминации ($R^2 > 45\%$), что указывает на контролируемую роль глубины, как фактора седиментации и формирования геохимических фаций. Одномерный регрессионный ана-

лиз позволил установить на более высоком уровне фаціальную дифференциацию в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря с выделением шельфовой зоны (до глубины 80 м) и зоны континентального склона (табл. 6; рис. 3).

Таким образом, литологический состав четырех изученных зон шельфа определяется воздействием следующих основных факторов: 1) интенсивностью терригенного стока, включая поступление как минерального материала, так и аллохтонного органического углерода (в том числе, реками Колыма и Индигирка); 2) тектонической структурой региона, в частности, неотектоническими разломами; 3) окислительно-восстановительными условиями седиментации; 4) морфологией дна; 5) локальным увеличением первичной продукции в зоне континентального склона, что, вероятно, связано с поступлением более теплых и соленых тихоокеанских вод через Берингов пролив и Чукотское море.

Финансирование. Финансирование работы К.В. Сыромятникова и М.А. Левитана происходило по теме государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук ГЕОХИ РАН № FMMZ-2024-0028. Финансирование работы Р.Р. Габдуллина происходило при поддержке государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова. Финансирование работы А.С. Ульянцева происходило при поддержке государственного задания Института океанологии им. П.П. Шишова (ИО РАН) по теме № FMWE-2024-0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксентов К.И., Саттарова В.В., Астахов А.С. Стратегические металлы в позднеголоценовых донных отложениях окраинных морей северо-востока Азии // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Междунар. науч. конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. М.: ИО РАН, 2025. С. 243–247.

Астахов А.С., Босин А.А., Ши С. и др. Осадконакопление и вариации ледовых условий Восточно-Арктических морей РФ в последние тысячелетия // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики: Сб. мат.-лов. Архангельск, 2020. С. 59–63.

Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: Управление навигации и океанографии МО РФ, 1980. 184 с.

Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2008. № 2. С. 183–195.

Винникова А.И., Душенко Н.В., Севастьянов В.С. и др. Геохимические исследования морских осадков на территории Восточно-Сибирского моря вблизи стока реки Индигирки // Труды IX Междунар. научно-практической конф. «Морские исследования и образование (Maresedu-2020)». Сборник. Т. II (III). М., 2020. С. 142–145.

Гресов А.И., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения. Т. 1. Углеметановые бассейны Приморья, Сахалина и Хабаровского края. Владивосток: Дальнаука, 2009. 246 с.

Дмитревский Н.Н., Ананьев Р.А., Мелузов А.А., Ульянцев А.С. Исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в морях восточной Арктики в 78-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев» // Океанология. 2018. Т. 58, № 1. С. 166–168.

Дударев О.В., Чаркин А.Н., Черных Д.В. и др. Литологические и биохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Междунар. науч. конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М.: ИО РАН, 2025. С. 74–76.

Иванов М.В., Алаторцев А.В., Аксентов К.И. Распределение ртути в донных осадках восточной Арктики // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Междунар. науч. конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. М.: ИО РАН, 2025. С. 129–133.

Конторович А.Э., Эпов М.И., Буриштейн Л.М. и др. Геология, ресурсы углеводородов шельфов Арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 7–17.

Левитан М.А., Сыромятников К.В., Рощина И.А., Штайн Р. Соотношение цвета и химического состава четвертичных донных осадков из южной части поднятия Менделеева и континентального склона Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2014. № 3. С. 233–248.

Маслов А.В. Источники материала поверхностных донных осадков востока Восточно-Сибирского моря (реконструкция по геохимическим данным) // Океанология. 2021. № 4. С. 592–608.

Маслов А.В., Ишерская М.В. Генетическая интерпретация вариаций некоторых петро- и геохимических параметров аргиллитов в разрезе венда Шкаповско-Шиханской впадины // Региональная геология, литология, геотектоника. 2004. С. 87–97.

Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э. и др. Экологическое состояние и минералого-геохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 595–610.

Неотектонические структуры и активные разломы шельфа // Геология и полезные ископаемые шельфов России: Атлас. М.: Научный мир, 2004. Лист 3-4.

Рябчук Д.В., Прищепенко Д.В., Ковалева О.А. и др. Литология поверхностных отложений Восточно-Сибирского моря по результатам геологического картирования акваториальной части листов r-56–60 // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 7. СПб.: ВСЕГЕИ, 2020. С. 188–197.

Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р. Закономерности распределения гранулометрических типов современных донных осадков и органического углерода по глубине в западной части Баренцева моря на основе методов математической статистики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022а. № 4. С. 52–62.

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

Талденкова Е.Е., Шманяк А.В., Кассенс Х. и др. Геологические исследования в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском в рамках 4-го этапа экспедиции «Трансарктика-2019» // Итоги экспедиционных исследований в 2019 г. в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген. Материалы конф. 26–27 февраля 2020. М.: СевастопольФИЦ, 2020. С. 53–56.

Ульянцев А.С., Стрельцова Е.А., Чаркин А.Н. Гранулометрические характеристики поверхностных донных осадков Чаунской губы // Океанология. 2024. Т. 64, № 3. С. 509–525.

Ульянцев А.С., Чаркин А.Н., Семин В.Л. и др. Геологические исследования верхней осадочной толщи Чаунской

губы в 60-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Опарин» // Океанология. 2021. Т. 61, № 4. С. 666–668.

Хахенберг Х., Шмидт А. Газохроматографический анализ равновесной паровой фазы. М.: Мир, 1979. 160 с.

Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 98–110.

Швалова Д.А., Зарубина Н.В. Геохимические исследования плейстоценовых отложений окраинно-шельфовой зоны Восточно-Сибирского моря и Северного Ледовитого океана // Геохимия. 2022. Т. 67, № 10. С. 961–977.

Эдер В.Г. Пиритизация пород зон перехода черносланцевой толщи к вмещающим отложениям на примере баженовской свиты Западной Сибири // Литол. и полез. ископ. 2020. № 3. С. 257–271.

Anderson L.G., Bjork G., Jutterstrom S., et al. East Siberian Sea, an Arctic region of very high biogeochemical activity // Biogeoscience. 2011. Vol. 8. Is. 8. P. 1745–1754.

Data Access Viewer (DAV). URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. 25.05.2025.

Hatch J.R., Leventhal J.S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. // Chem. Geol. 1992. Vol. 99. P. 65–82.

Hofmann P., Ricken W., Schwark L. Leythaeuser coupled oceanic effects of climatic cycles from late Albian deep-sea sections of the North Atlantic // Evolution of the Cretaceous Ocean Climate System, Geological Society of America. 1999. Special Paper 332. P. 143–160.

Rachold V. Major, trace and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Arctic Ocean // In Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. P. 199–222.

Viscosi-Shirley C., Mammone K., Piasias N., et al. Clay mineralogy and multi-element chemistry of surface sediments on the Siberian-Arctic shelf: implications for sediment provenance and grain size sorting // Continental Shelf Research. 2003. Vol. 23, № 11–13. P. 1175–1200.

Статья поступила в редакцию 15.08.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 27.02.2026