

УДК 551.351

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-50-59

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОННЫХ ОСАДКОВ С ФАЦИАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ ИХ НАКОПЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЧАУНСКОЙ ГУБЫ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

Александр Сергеевич Ульянов¹, Кирилл Владимирович Сыромятников²,
Руслан Рустемович Габдуллин³✉

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия; uleg85@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8798-4425>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; gabdullin@geokhi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

Аннотация. В результате применения многомерной статистической обработки исследовано распределение и взаимосвязь гранулометрических параметров (процентного вклада размерных фракций, среднего диаметра частиц, коэффициентов сортировки, эксцесса, асимметрии) поверхностных донных осадков Чаунской губы Восточно-Сибирского моря. С использованием корреляционно-регрессионного и факторного анализов подтверждена пространственная изменчивость фациальных обстановок, согласующаяся с физико-географическими характеристиками, строением береговой зоны исследованной акватории, закономерностями механической дифференциации осадочного материала. Выявлены взаимосвязи между фракциями песка, пелита, глубиной воды, коэффициентом сортировки и получены соответствующие регрессионные модели. Подтверждено, что для прибрежных фаций характерны хорошо сортированные песчаные осадки, которые накапливаются в условиях активного гидродинамического режима и влияния приливно-отливных течений, а при удалении от берега с увеличением глубины и ослаблением гидродинамики при воздействии донных течений в прибрежно-морских фациях развиты плохо сортированные пелито-алевритовые и алеврито-пелитовые осадки с примесью песчаного материала.

Ключевые слова: донные осадки, Чаунская губа, гранулометрические характеристики, диаметр частиц, сортировка, асимметрия, эксцесс, одномерный регрессионный анализ, факторный анализ

Для цитирования: Ульянов А.С., Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р. Применение многомерного статистического анализа для исследования взаимосвязи гранулометрических характеристик донных осадков с фациальными условиями их накопления на примере Чаунской губы Восточно-Сибирского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 5. С. 50–59.

APPLICATION OF MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS TO STUDY THE RELATIONSHIP BETWEEN GRANULOMETRIC CHARACTERISTICS OF BOTTOM SEDIMENTS AND FACIES CONDITIONS OF THEIR ACCUMULATION (A CASE STUDY IN THE CHAUN BAY, EAST SIBERIAN SEA)

Alexander S. Ulyantsev¹, Kirill V. Syromyatnikov², Ruslan R. Gabdullin³✉

¹ Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia; uleg85@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, Russia; sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8798-4425>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; gabdullin@geokhi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

Abstract. The distribution and relationships between granulometric parameters (percentage of size fractions, mean particle diameter, sorting coefficients, kurtosis, and skewness) of surface bottom sediments from the Chaun Bay of the East Siberian Sea were investigated with multivariate statistical processing. Using correlation, dispersion and factor analyses, the spatial variability of facies conditions was found to be consistent with the geographic characteristics, the structure of the coastal zone of the studied area, as well as mechanical differentiation of sedimentary material. Univariate regression analysis was employed to reveal the relationships between sand, clay, water depth, and sorting coefficient, and to obtain the corresponding regression models. The coastal facies are represented by good-sorted sandy sediments, which accumulate under conditions of active hydrodynamic regime and influence of tidal currents. Conversely, at a distance from the coast, with increasing depth and weakening of hydrodynamics under the influence of bottom currents, poorly sorted clayey-silty and silty-clayey sediments with sandy material are spread in the coastal-marine facies.

Keywords: bottom sediments, Chaun Bay, grain size, particle diameter, sorting, skewness, kurtosis, univariate regression analysis, factor analysis

For citation: Ulyantsev A.S., Syromyatnikov K.V., Gabdullin R.R. Application of multivariate statistical analysis to study the relationship between granulometric characteristics of bottom sediments and facies conditions of their accumulation (a case study in the Chaun Bay, East Siberian Sea). *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 5: 50–59. (In Russ.)

Введение. Гранулометрические характеристики донных осадков океанов и морей являются важным инструментом для понимания современных и древних обстановок седиментации [Петелин, 1967; Свальнов, Алексеева, 2005; Folk, Ward, 1957; Krumbein, 1934]. Они зависят от многих факторов, ведущими из которых являются химический состав осадков, рельеф и тектоника дна, циркуляция атмосферы и водных масс, биопродуктивность акваторий и их региональные особенности, зональность природных процессов. Формирование же размерных спектров донных осадков контролируется в основном гидродинамикой и седиментацией. Степень сортировки осадочного вещества, средний диаметр частиц и их распределение по размерным фракциям позволяют судить о гидродинамических и морфометрических условиях седиментации и вещественно-генетических типах осадков, т. е. служат источником генетической информации.

Статистические методы анализа в сочетании с многомерной статистической и хемометрической обработкой данных нашли широкое применение в решении геолого-геохимических и литолого-фациальных задач. Они применяются для оценки взаимосвязи различных геологических, геохимических и литологических параметров, оценки их информативности и индикаторного значения, выделения специфичных пространственных областей, например, при расчленении геологических разрезов, типизации ОБ, седиментации и обстановок осадконакопления [Астахов и др., 2013; Колесник и др., 2017; Сыромятников, Габдуллин, 2022; Сыромятников, Левитан, 2021; Ульяновцев и др., 2021a; Ulyantsev, 2024]. На примере Чаунской губы Восточно-Сибирского моря в настоящей работе освещены результаты применения многомерного статистического подхода, сочетающего дисперсионный, корреляционно-регрессионный и факторный анализ данных гранулометрического состава донных осадков, одновременное рассмотрение широкого набора гранулометрических индикаторов и нескольких групп образцов.

Материалы и методы исследований. Материалом для исследования послужили 174 пробы донных осадков, собранные с помощью коробчатого пробоотборника в акватории Чаунской губы в 60 рейсе НИС «Академик Опарин» в Восточно-Сибирское море [Ульянцев и др., 2021b]. Отбор проб производили из окисленного, смешанного и восстановленного слоев в пластиковые зип-пакеты. Пробы хранили в холодильнике при температуре +4°C до лабораторной обработки. Расположение станций пробоотбора представлено на рис. 1.

Анализы гранулометрического состава донных осадков были выполнены в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН с помощью метода лазерной дифракции после мокрого рассева песчаной фракции на анализаторе Шимадзу SALD 2300 (Япония). Для характеристики гранулометрического состава исследованных осадков были рассчитаны процентное распределение фракций песка (>63 мкм), крупного (10–63 мкм) и тонкого (2–10 мкм) алеврита, пелита (<2 мкм) по массе, средний диаметр частиц (M_z), коэффициент сортировки (So) и стандартное отклонение (σ_1), асимметрия (Sk_1) и эксцесс (K_G). Методика обработки проб, их анализов, расчетов гранулометрических параметров подробно изложены в [Ulyantsev, et al., 2024]. Выделение гранулометрических фракций было выполнено в соответствии с двоичной логарифмической шкалой [Wentworth, 1922].

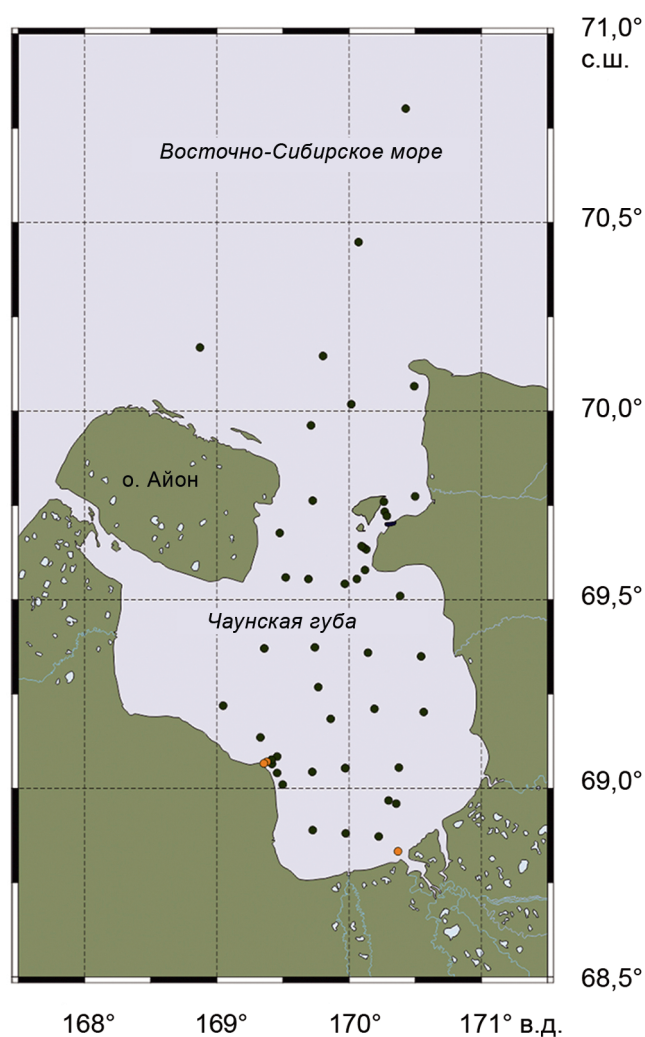


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб донных осадков акватории Чаунской губы

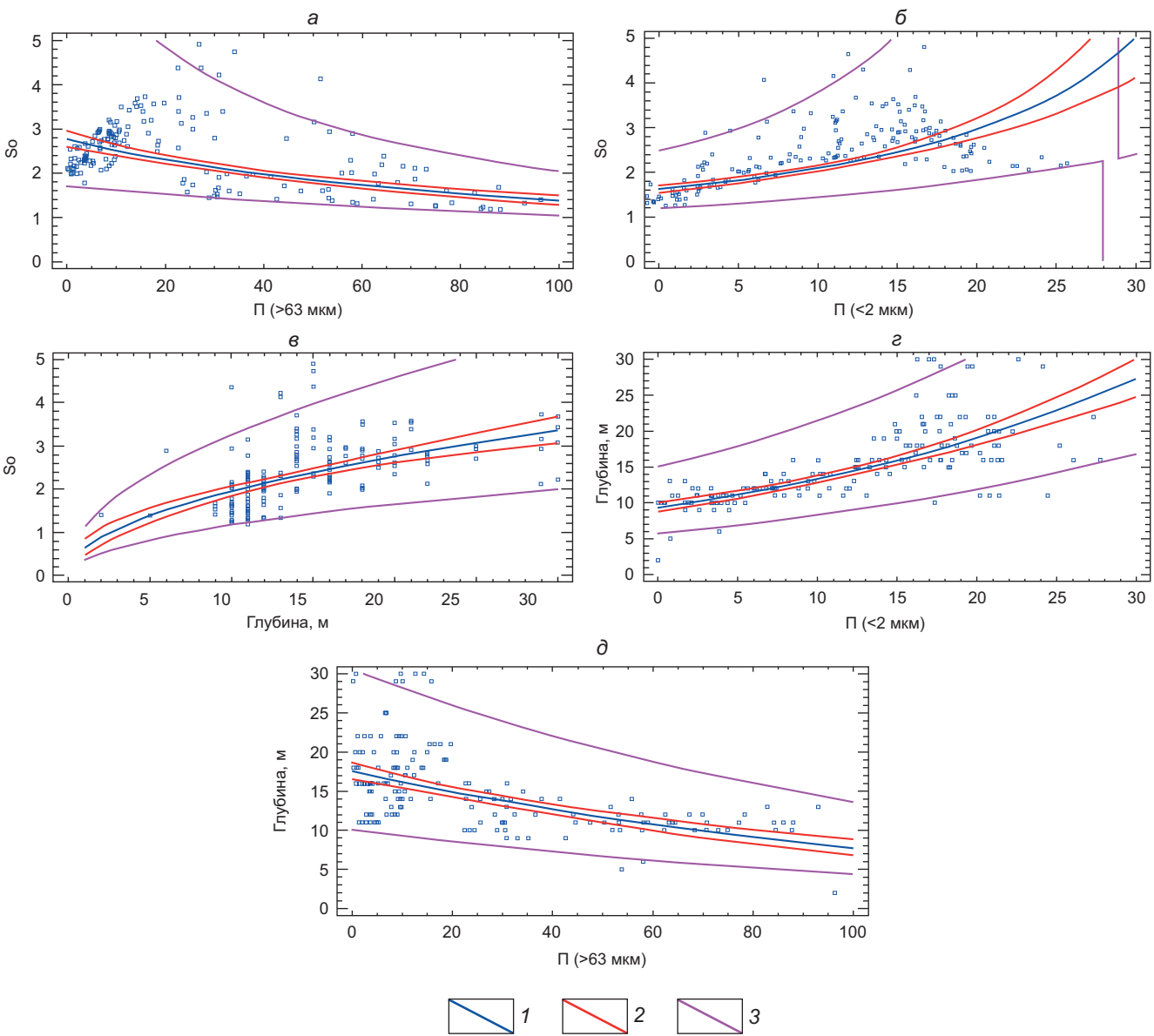


Рис. 2. Диаграммы нелинейной регрессионной взаимосвязи между: а — коэффициентом сортировки и вкладом песка (>63 мкм), б — коэффициентом сортировки и вкладом пелита (<2 мкм), в — коэффициентом сортировки и глубиной моря, г — глубиной моря и вкладом пелита (<2 мкм), д — глубиной моря и вкладом песка (>63 мкм)

Таблица 1

Результаты одномерного регрессионного анализа взаимосвязей гранулометрических параметров донных осадков Чаунской губы и глубины моря

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции (r)	Коэффициент детерминации (R ²), %	Стандартная ошибка регрессии (SE)	P-значение (p)
$So = 1/(0,36 + 0,00358П)$	–0,63	39,2	0,11	0,000
$So = 1/(0,62 - 0,014Пл)$	–0,70	45,9	0,11	0,000
$So = 0,62D^{0,5}$	0,60	31,0	0,26	0,000
$D = \exp(2,23 + 0,036Пл)$	0,70	52,9	0,20	0,000
$D = \exp(2,87 - 0,008П)$	–0,60	36,0	0,28	0,000

Примечание: So — коэффициент сортировки; П — фракция песка (>63мкм), %; Пл — фракция пелита (<2 мкм), %; D — глубина воды, м. Количество исследуемых образцов n = 174.

Для анализа взаимосвязи коэффициента сортировки, глубины воды, различных гранулометрических фракций донных осадков был применен метод одномерного регрессионного анализа в программе Statgraphics plus V.5. Факторный и корреляционный анализы выполнены с использованием программного пакета XLSTAT Premium v2016.02. Численные данные по расчетным гранулометрическим параметрам и распределению размерных фракций в каждой пробе доступны в [Ulyantsev, et al., 2023].

Результаты и обсуждение. Ранее была продемонстрирована специфичная изменчивость гранулометрического состава донных осадков Чаунской губы в зависимости от удаленности от берега, глубины воды и рельефа дна [Ulyantsev, et al., 2024]. Так, осадки, обогащенные песчаным (>63 мкм) материалом распространены в южной и западной частях исследованной акватории, где сосредоточен речной сток. Фракция крупного алеврита (10–63 мкм), маркирующая вклад криогенных отложений и золотого переноса, сосредоточена на востоке, а ее повышенные концентрации отмечены на юго-западе и в западной части горла губы. Наиболее тонкозернистые осадки (2–10 и <2 мкм) распространены в центральной части, горле губы и на выходе в Восточно-Сибирское море.

Регрессионный анализ. Результаты одномерного регрессионного анализа по связи коэффициента сортировки (S_o), глубины моря, процентного вклада фракций песка (>63 мкм) и пелита (<2 мкм) надежно подтвердили влияние механической дифференциации материала в процессе его транспортировки и осаджения в акватории Чаунской губы. Рассмотрим распределение первой пары >63 мкм- S_o . Здесь наблюдается отрицательная нелинейная корреляция между с уровнем достоверности 99 % ($p<0,01$). Коэффициент корреляции (r) равен –0,63, а коэффициент детерминации (R^2) составил 39,2 %. При этом стандартная ошибка (SE) составила всего 0,11 (табл. 1; рис. 2, а). В то же время в паре <2 мкм- S_o наблюдается положительная нелинейная связь с уровнем достоверности 99 % ($p<0,01$). R^2 при этом равен 45,9 %, а коэффициент корреляции составил –0,70 при SE в 0,11 (табл. 1; рис. 2, б).

Положительная нелинейная связь также отмечена между S_o и глубиной моря (уровень достоверности 99 %, $p<0,01$). Величины r и R^2 равны 0,60 и 31,0 % соответственно при SE равной 0,26 (табл. 1; рис. 2, в). В то же время отмечена положительная нелинейная регрессионная взаимосвязь пелита с глубиной моря (табл. 1; рис. 2, г). Величины r и R^2 составили 0,70 и 52,9 % соответственно, SE — 0,20. При этом прослеживается отрицательная регрессионная связь глубины моря и песка (>63 мкм) с уровнем достоверности 99 % ($p<0,01$) (табл. 1; рис. 2, д). Примечательно, что величина S_o донных осадков Чаунской губы максимально возрастает с глубин от 5 до 10 м в 1,4 раза, далее с ростом глубины он возрастает примерно одинаково — с 10–15 и 15–20 м в 1,2 раза и от 20 до 25 м в 1,1 раза (табл. 2), что вызывает

ухудшение сортировки зерен осадочного материала в направлении увеличения глубины воды.

Как известно [Пустовалов, 1940], механическая дифференциация проявляется в сортировке обломочных частиц в зависимости от их размера, формы и плотности, обусловленной уменьшением энергии потоков, переносящих обломочный материал. В результате транспортировки осадочного материала многочисленными мелкими реками, впадающими в Чаунскую губу, песчаный материал отлагается вблизи берега, а более тонкий (алевритовый и пелитовый) материал переносится вглубь губы. В результате повышенной гидродинамики водной среды вблизи берега в песчаных осадках вследствие активного влияния приливно-отливных течений происходит размыв алевритовых и пелитовых зерен, благодаря чему они хорошо сортируются [Соловьева, Шарданова, 2015]. При удалении от берега с увеличением глубины моря (табл. 2) накапливаются менее сортированные пелитовые и алеврито-пелитовые осадки с песчаной примесью, что, вероятнее всего, вызвано снижением в прибрежно-морской зоне гидродинамической активности и процессами перемешивания частиц осадка между собой из-за влияния донных течений.

Таблица 2

Увеличение коэффициента сортировки осадочного материала на основе построенной модели регрессии

Глубина, м	S_o	Δ^*	Глубина, м	S_o	Δ^*
5	1,38	–	20	2,74	1,2
10	1,95	1,4	25	3,06	1,1
15	2,38	1,2			

Примечание: S_o — коэффициент сортировки осадочного материала; Δ^* — превышение коэффициента сортировки осадочного материала, в зависимости от глубины.

Корреляционный и факторный анализ. Для оценки взаимосвязи гранулометрических характеристик исследованных донных осадков и анализа природных факторов, оказавших наибольшее влияние на формирование гранулометрического состава, была проведена многомерная статистическая обработка полученных данных методами корреляционно-регрессионного и факторного анализов, а также главных компонент. В обработку были взяты M_z , S_o , σ_r , K_G , Sk_r , процентное содержание размерных фракций >63, 10–63, 2–10 и <2 мкм. Результаты корреляционно-регрессионного (табл. 3) и факторного (табл. 4) анализов позволили комплексно оценить связь между исследованными гранулометрическими параметрами, охарактеризовать факторы, влияющие на гранулометрический состав исследованных донных осадков.

Для первого фактора (F1), объясняющего 55,7 % дисперсии, значимые (>0,5) положительные нагрузки отмечены для S_o , σ_r , Sk_r , 2–10 и <2 мкм, отрицательные — для M_z , K_G и >63 мкм. Отмеченные

Таблица 3

Корреляционная матрица гранулометрических параметров исследованных осадков (n = 174)

Параметр	M _Z	So	σ ₁	K _G	Sk ₁	> 63 мкм	10–63 мкм	2–10 мкм	< 2 мкм
M _Z	–	–0,229	–0,222	0,418	–0,075	0,756	–0,474	–0,583	–0,564
So	–0,229	–	0,883	–0,745	0,423	–0,412	–0,011	0,470	0,530
σ ₁	–0,222	0,883	–	–0,665	0,392	–0,493	0,044	0,534	0,579
K _G	0,418	–0,745	–0,665	–	–0,422	0,615	–0,223	–0,566	–0,593
Sk ₁	–0,075	0,423	0,392	–0,422	–	–0,444	–0,280	0,710	0,693
> 63 мкм	0,756	–0,412	–0,493	0,615	–0,444	–	–0,534	–0,834	–0,805
10–63 мкм	–0,474	–0,011	0,044	–0,223	–0,280	–0,534	–	–0,016	–0,054
2–10 мкм	–0,583	0,470	0,534	–0,566	0,710	–0,834	–0,016	–	0,971
< 2 мкм	–0,564	0,530	0,579	–0,593	0,693	–0,805	–0,054	0,971	–

Таблица 4

Значения факторных нагрузок F1–F4 гранулометрических параметров исследованных осадков (n = 174)

Параметр \ Фактор	F1	F2	F3	F4
M _Z	–0,625	–0,618	0,181	0,358
So	0,734	–0,304	0,551	–0,094
σ ₁	0,754	–0,253	0,499	–0,094
K _G	–0,801	0,004	–0,369	–0,121
Sk ₁	0,649	–0,498	–0,356	0,391
> 63 мкм	–0,875	–0,417	0,160	–0,123
10–63 мкм	0,180	0,876	0,265	0,338
2–10 мкм	0,906	–0,069	–0,381	–0,059
< 2 мкм	0,915	–0,115	–0,321	–0,112

Примечание: в таблицах полужирным выделены значения коэффициента корреляции Пирсона $r > 0,5$ и $< -0,5$, курсивом — значения r , близкие к 0,5 и $-0,5$.

максимальные ($>0,9$) величины нагрузок фракций 2–10 и <2 мкм указывают на их родственный генезис в осадках, что также подтверждается высоким значением коэффициента корреляции ($r = 0,97$). Для этой же пары характерна значимая положительная корреляция с Sk_1 , So и σ_1 и отрицательная с M_Z , K_G и >63 мкм. В первом случае возрастание доли тонкозернистых фракций в осадках приводит к снижению степени сортировки (возрастают So и σ_1), а на размерных спектрах — к смещению кривой распределения частиц в сторону уменьшения диаметра частиц (Sk_1 также возрастает). Во втором случае общее снижение вклада тонкозернистых фракций приводит к увеличению M_Z , а также отражается на размерных спектрах, на которых наблюдается более симметричная кривая распределения частиц без выраженных вторичных максимумов (K_G стремится к значениям < 1). Значимая отрицательная корреляция между содержанием песка (>63 мкм) и фракций 2–10 мкм ($r = -0,83$) и < 2 мкм ($r = -0,81$) в совокупности с отрицательной нагрузкой F1 ($-0,875$) объясняются антагонизмом весового вклада песка в осадках и различиями их литологического состава. Результаты факторного анализа согласуются с данными кор-

реляционного анализа и позволяют заключить, что фактор F1, разделивший большинство расчетных параметров, является комбинированным, сочетающим в себе физико-географическую, динамическую и генетическую составляющие. Его проявление связано с региональной динамикой седиментационных потоков и их сезонностью.

Для исследованных осадков отмечена отрицательная связь степени сортировки частиц с асимметрией ($So-K_G$ и σ_1-K_G , $r = -0,75$ и $-0,67$ соответственно) в совокупности с положительной корреляцией с концентрацией песка ($K_G->63$ мкм, $r = 0,62$). Возрастание массовой доли песчаной фракции в данном случае приводит к полимодальности кривой распределения частиц (K_G возрастает), однако при этом степень сортировки отложений возрастает (So и σ_1 снижаются). Это свидетельствует о том, что большинство проанализированных песчаных осадков отличается полимодальностью размерных спектров, что, по видимому, является следствием их полимиктовости (кварц, полевые шпаты, сланцы и др.). В случае же осадков алеврито-пелитовой и пелитовой зернистости, составляющих основную массу проанализированных образцов, эта закономерность нарушается ввиду незначительного вклада фракции > 63 мкм. Прямая корреляция $M_Z-> 63$ мкм ($r = 0,76$) наряду с отрицательными с 10–63, 2–10 и < 2 мкм ($r = -0,47$, $-0,58$ и $-0,56$ соответственно) указывает на то, что величина среднего диаметра частиц в большей степени определяется вкладом песчаной фракции.

Второй фактор (F2) объясняет 19,4 % дисперсии, и единственная значимая положительная нагрузка отмечена для фракции 10–63 мкм при отрицательных нагрузках M_Z и Sk_1 . Следует отметить, что процентный вклад фракции 10–63 мкм — единственный параметр, не вошедший в группу F1, что связано с особенностями генезиса и распространения частиц этой размерности. Например, в криогенных отложениях массовое содержание и состав частиц размером 10–63 мкм информативны как индикатор их эолового происхождения [Schirrmeister, et al., 2003; Strauss, et al., 2013]. Поскольку полигональ-

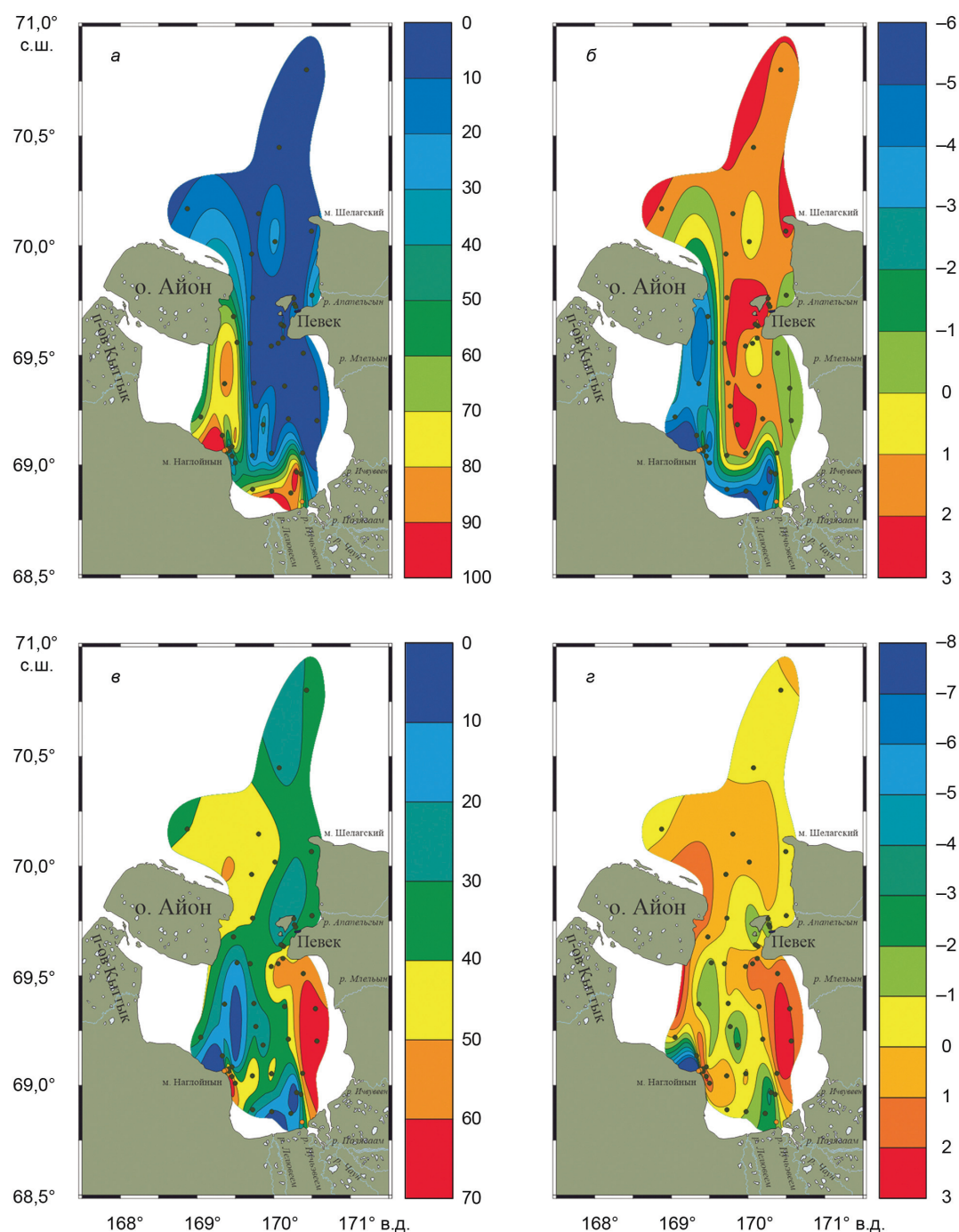


Рис. 3. Карты-схемы пространственного распределения величины факторных счетов (F1 и F2) и массовой доли (в %) гранулометрических фракций в поверхностном (окисленном) слое осадков: а — фракция > 63 мкм, б — счета фактора F1, в — фракция 10–63 мкм, г — счета фактора F2

но-тундровый ландшафт в Чаунской губе широко развит в западной и южной частях, поступление в осадки частиц крупноалевритовой размерности может быть вызвано разгрузкой криогенных тундровых толщ, а также эоловой сальтации и сезонного ледового переноса. Отрицательные нагрузки M_z и Sk_1 объясняются накоплением фракции 10–63 мкм преимущественно в алеврито-пелитовых и алевритовых осадках, для которых характерны меньшие по сравнению с песчаными разностями диаметр частиц и асимметричные размерные спектры. В отличие от

F1, фактор F2, выделивший эту группу параметров, скорее генетический, связанный с происхождением крупноалевритовой фракции. На примере окисленного слоя донных осадков пространственное распределение значений счетов F1 и F2 хорошо согласуется с вкладом фракций > 63 и 10–63 мкм (рис. 3), что подтверждает результаты факторного анализа.

Положительные значимые нагрузки третьего фактора (F3), объясняющего 13,2 % дисперсии, отмечены для коэффициентов сортировки So и σ_1 . Это объясняется их общим физическим смыслом

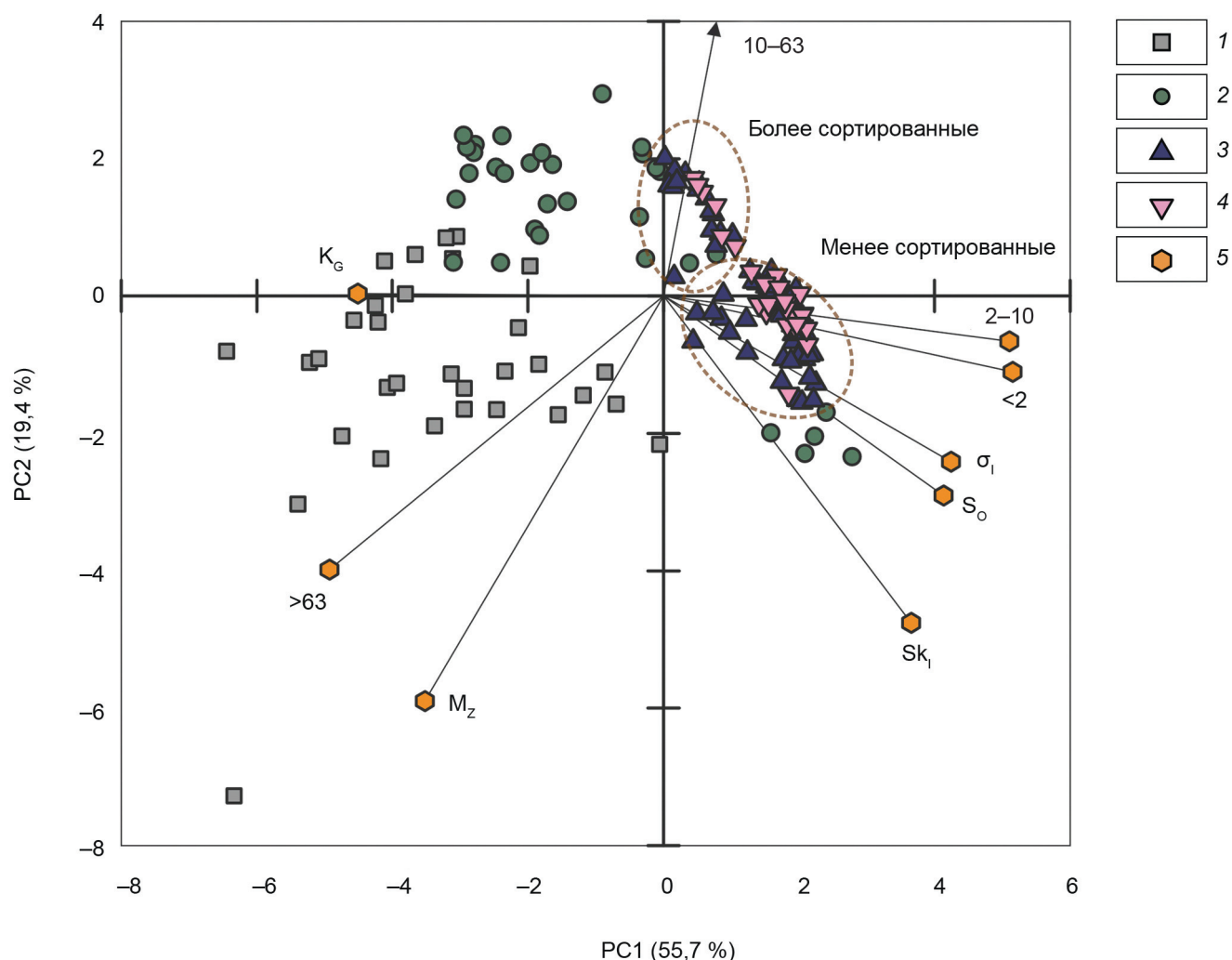


Рис. 4. Диаграмма главных компонент исследованных гранулометрических параметров: 1 — счета образцов песчаной размерности, 2 — счета образцов алевритовой размерности, 3 — счета образцов алеврито-пелитовой размерности, 4 — счета образцов пелитовой размерности, 5 — нагрузки гранулометрических параметров донных осадков

и схожей изменчивостью, что подтверждается высокой взаимной корреляцией ($r=0,88$). Выявленный «сортировочный» фактор F3 является уже литодинамическим, отражающим влияние течений и ветрового воздействия на сортировку частиц донных осадков. Для фактора F4 с объясняемой дисперсией 5,1 % значимых величин факторных нагрузок не отмечено, однако они появляются при рассмотрении отдельных групп осадков (окисленного, смешанного и восстановленного слоев), о чем речь пойдет ниже.

Анализ главных компонент. Сопоставление счетов F1 и F2 с величиной нагрузок исследованных параметров на диаграмме главных компонент позволило выделить характерные гранулометрические ассоциации (рис. 4). Если горизонтальное разделение образцов вызвано влиянием фактора F1, то вертикальное распределение точек счетов на диаграмме больше связано с вкладом крупноалевритовой фракции (10–63 мкм), отвечающей единственной положительной нагрузке F2. В левой части диаграммы расположились нагрузки M_z , K_G и > 63 мкм, соответствующие отрицательным значениям F1. Здесь сосредоточены счета образцов, отвечающих песча-

ному (нижняя половина) и алевритовому (верхняя половина) гранулометрическому составу, а также их комбинациям. Для них характерны высокие значения K_G , среднего диаметра частиц и высокий вклад фракции > 63 мкм, а диаметрально расположен относительно S_o и σ_1 говорит о сравнительно высокой степени сортировки. Столь неравномерное расположение точек объясняется широким диапазоном значений M_z и процентного вклада песка.

В свою очередь, в правой части диаграммы сосредоточились нагрузки S_o , σ_1 , Sk_1 , фракций 2–10 и < 2 мкм, соответствующие положительным значениям F1. В этой же области компактно расположились счета образцов, соответствующих пелитовым и алеврито-пелитовым разностям, для которых интервалы значений M_z , Sk_1 , S_o , σ_1 и K_G заметно меньше по сравнению с осадками песчаной и алевритовой размерности. В зависимости от общей доли отдельных фракций, степени сортировки и типов размерных спектров эти точки сформировали вытянутое облако, в котором идентифицируется подгруппа более сортированных осадков. Попадание в эту группу ряда алевритовых разностей связано с воз-

Таблица 5

Значения коэффициентов корреляции Пирсона факторных счетов F1–F4 с величинами гранулометрических параметров донных осадков окисленного слоя (n = 48)

Фактор Параметр	F1	F2	F3	F4
M _Z	–0,650	–0,791	–0,009	0,699
So	0,789	0,013	0,553	–0,206
σ _I	0,834	0,019	0,406	–0,140
K _G	–0,758	–0,325	–0,396	0,211
Sk _I	0,388	–0,576	–0,360	0,509
> 63 мкм	–0,929	–0,533	–0,009	0,190
10–63 мкм	0,409	0,853	0,377	0,013
2–10 мкм	0,933	0,146	–0,235	–0,247
< 2 мкм	0,927	0,115	–0,226	–0,265

Таблица 6

Значения коэффициентов корреляции Пирсона факторных счетов F1–F4 с величинами гранулометрических параметров донных осадков смешанного слоя (n = 45)

Фактор Параметр	F1	F2	F3	F4
M _Z	–0,696	–0,498	0,295	–0,322
So	0,784	–0,374	0,512	0,130
σ _I	0,778	–0,348	0,546	0,131
K _G	–0,826	0,033	–0,500	–0,572
Sk _I	0,828	–0,283	–0,247	0,424
> 63 мкм	–0,880	–0,408	0,088	–0,604
10–63 мкм	0,282	0,895	0,190	0,716
2–10 мкм	0,910	–0,086	–0,279	0,281
< 2 мкм	0,933	–0,168	–0,180	0,222

Таблица 7

Значения коэффициентов корреляции Пирсона факторных счетов F1–F4 с величинами гранулометрических параметров донных осадков восстановленных слоев (n = 81)

Фактор Параметр	F1	F2	F3	F4
M _Z	–0,535	–0,352	0,652	–0,263
So	0,621	–0,670	0,560	–0,070
σ _I	0,559	–0,718	0,562	–0,093
K _G	–0,850	0,462	–0,246	–0,084
Sk _I	0,874	–0,589	–0,408	0,169
> 63 мкм	–0,738	–0,200	0,537	–0,437
10–63 мкм	–0,341	0,896	0,208	0,690
2–10 мкм	0,881	–0,380	–0,622	–0,008
< 2 мкм	0,889	–0,417	–0,549	–0,125

росшей в их составе долей тонкозернистых фракций (2–10 и <2 мкм), и, как следствие, низкой степенью сортировки (заметно возрастают So, σ_I и Sk_I).

Анализ гранулометрических групп. Для верификации результатов факторного анализа был проведен корреляционно-регрессионный анализ между исследованными параметрами (M_Z, So, σ_I, K_G, Sk_I, > 63, 10–63, 2–10 и < 2 мкм) и факторными счетами F1–F4 отдельно для трех групп осадков, соответствующих окисленному (табл. 5), смешанному (табл. 6) и восстановленному (табл. 7) слоям. В последнюю группу были объединены все образцы, соответствующие восстановленным слоям, поскольку вертикальные различия гранулометрического состава между ними минимальны. Так, для F1 отмечена значимая положительная корреляция с So, σ_I, Sk_I, 2–10 и <2 мкм, а отрицательная — с M_Z, K_G и >63 мкм, что согласуется с результатами факторного анализа всей совокупности исследованных образцов. Исключением является нарушение корреляции в паре F1–Sk_I для окисленного слоя осадков, что свидетельствует о более высоком вкладе тонкозернистых фракций в их составе. Для окисленного и смешанного слоев в парах F1–2–10 мкм и F1–<2 мкм по-прежнему сохраняется значительная (r>0,9) положительная связь, отражающая схожий генезис этих фракций и взаимный вклад. В случае же восстановленного слоя осадков эта корреляция немного ослабевает, отражая общее снижение вклада фракций 2–10 и <2 мкм.

Общим для F2 является значимая положительная корреляция с массовой долей в осадках крупноалевритовой фракции (10–63 мкм), также согласующаяся с результатами факторного анализа, однако между группами осадков наблюдаются различия. Для окисленного слоя отмечена отрицательная корреляция F2 с M_Z, Sk_I и >63 мкм, для смешанного — только с M_Z, а для восстановленного — с Sk_I, So и σ_I. В последнем случае крупноалевритовая фракция восстановленного слоя осадков отличается сравнительно лучшей сортировкой частиц с преобладанием более крупных частиц, что может быть вызвано изменчивостью седиментационных потоков на соответствующем временном интервале. Относительно результатов факторного анализа общей выборки, для смешанного слоя осадков ослабевает связь в паре F2–Sk_I, свидетельствующая здесь о более тонкозернистом составе фракции 10–63 мкм и ее низкой степенью сортировки. Для окисленного слоя осадков наблюдается схожая с результатами факторного анализа картина (отрицательная корреляция с M_Z и Sk_I), но оказало влияние общее увеличение массовой доли песчаной фракции (отрицательная корреляция с >63 мкм), что сказалось на повышении среднего диаметра частиц (отрицательная корреляция с M_Z). Этот вывод подтверждается постепенным ростом M_Z и процентного вклада фракции >63 мкм в ряду восстановленный–смешанный–окисленный осадочный слой. Постепенно угасающая с глубиной залегания отрицательная корреляция F1 и F2 с >63 мкм,

а также F2 с M_z , отражает ведущий вклад песчаной фракции в величину среднего диаметра частиц и общее увеличение массовой доли песка в осадках по мере перехода к более современным условиям седиментации, характеризующимся усилением речной разгрузки, термоабразии многолетнемерзлых толщ и абразии берегов на фоне современных климатических изменений. Это также подтверждается постепенным снижением в осадках массовой доли алевритовой и пелитовой фракций.

Положительная корреляция счетов F3 коэффициентами сортировки So и σ_1 отмечена для всех выделенных групп осадков. Для пары F3- σ_1 окисленного слоя осадков связь ослабевает ($r = 0,41$), тем не менее, выявленная картина согласуется с общими результатами факторного анализа. Появление отрицательной связи в паре F3- K_G для смешанного слоя осадков свидетельствует здесь о низкой по сравнению с окисленным и восстановленным слоями степени сортировки тонкозернистых фракций. Результаты анализа данных для восстановленного слоя осадков дополнительно выявили положительную корреляцию F3 с M_z и >63 мкм, а отрицательную — с 2–10 и <2 мкм. В данном случае выявленная корреляционная закономерность связана здесь с более низкой сортировкой песчаной фракции (положительная корреляция F3 с M_z , So , σ_1 и >63 мкм,) и ее пониженным вкладом (отрицательная корреляция F3 с 2–10 и <2 мкм).

В случае фактора F4, для которого значимых нагрузок по результатам факторного анализа не обнаружено, выявлена индивидуальная корреляционная закономерность для каждой группы осадков. Для окисленного слоя осадков отмечена положительная связь F4 с M_z и Sk_1 , для смешанного слоя — отрицательная с K_G и >63 мкм, положительная — с 10–63 мкм, для восстановленного слоя осадков — положительная с 10–63 мкм. В двух последних случаях положительная связь в паре F4-10–63 мкм отражает больший по сравнению с окисленным слоем вклад крупноалевритовой фракции в осадки смешанного и восстановленного слоев, но с разницей — для смешанного слоя вклад хорошо сортированных песков ниже (отрицательная корреляция с >63 мкм и K_G). Этот вывод подтверждается трендом роста средней величины процентного вклада фракции 10–63 мкм и снижением вклада песков от окисленного слоя осадков к восстановленному [Ulyantsev, et al., 2024]. В случае окисленного слоя осадков величина среднего диаметра частиц (M_z), в первую очередь зависящая от массовой доли песка, также сопряжена с типом размерных спектров, отражающих больший по сравнению с нижележащими горизонтами вклад фракции >63 мкм (положительная корреляция с Sk_1). Вероятнее всего фактор F4, влияние которого проявляется неравномерно по группам осадков, является генетическим (как и F2), связанным с позднеголоценовой изменчивостью седиментационных потоков в рассматриваемом районе.

Заключение. Комплекс полученных данных и результаты их многомерной статистической обработки позволил охарактеризовать распределение и взаимосвязь гранулометрических фракций, среднего диаметра частиц, коэффициентов сортировки, эксцесса, асимметрии поверхностных донных осадков Чаунской губы Восточно-Сибирского моря. Было подтверждено, что зональность гранулометрических типов осадков здесь в первую очередь связана с региональными физико-географическими особенностями, механической дифференциацией осадочного материала в процессе его транспортировки в пределах исследованной акватории, что отвечает их фаціальным обстановкам накопления, которые соответствуют определенному рельефу дна, различному влиянию речного стока, термоабразии берегов, воздействию придонных течений и прочих природными процессами. Статистически выявленная изменчивость гранулометрических характеристик исследованных осадков с глубиной их залегания подтверждает неравномерный характер позднеголоценовой изменчивости гидродинамики, речных и термоабразионных потоков вещества.

На основе одномерного регрессионного анализа установлены статистически значимые взаимосвязи между гранулометрическими типами осадков (песка и пелита), глубиной моря и коэффициентом сортировки, что позволило получить соответствующие регрессионные модели. Было подтверждено, что прибрежные фации характеризуются преимущественно хорошо отсортированными песчаными осадками, которые накапливаются в условиях активного гидродинамического режима и влияния приливно-отливных течений, размывающих частицы алевритовой и пелитовой размерности. При увеличении глубины моря и ослабления гидродинамики водной среды в прибрежно-морских фациях при воздействии донных течений аккумулируются слабо сортированные пелитовые и алеврито-пелитовые осадки с примесью песчаного материала.

Полученные результаты корреляционно-регрессионного и факторного анализов будут полезны, например, при построении моделей позднечетвертичной седиментации на арктическом шельфе, расчленении геологических разрезов, составлении литолого-палеогеографических и литолого-фациальных карт и схем.

Финансирование. Экспедиционные и аналитические работы, выполненные А.С. Ульяновым, финансировались за счет Госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0019). Финансирование работ К.В. Сыромятникова, Р.Р. Габдуллина происходило 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

- Астахов А.С., Рудзян Ван, Крэйн К. и др. Литохимическая типизация обстановок полярного осадконакопления (Чукотское море) методами многокомпонентного статистического анализа // Геохимия. 2013. № 4. С. 303–325.
- Колесник А.Н., Астахов А.С., Колесник О.Н. Обстановки современного осадконакопления в Чукотском море и прилегающих районах Северного Ледовитого океана (по результатам Q-кластеризации геохимических и гранулометрических данных) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 12. С. 1853–1866.
- Петелин В.Н. Гранулометрический анализ донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
- Пустовалов Л.В. Петрография осадочных пород. Часть первая. Основы литологии (петрология) осадочных пород. М.; Л.: Государственное научно-техническое изд-во нефтяной и горно-топливной литературы, 1940. 476 с.
- Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н. Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 297 с.
- Соловьева Н.А., Шарданова Т.А. Генетический анализ осадочных отложений нефтегазоносных бассейнов: Учебное пособие. М.: ОАО «Окружная газета ЮЗАО», 2015. 156 с.
- 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. 2022. № 5. С. 99–112.
- Сыромятников К.В., Левитан М.А. Применение дисперсионного и регрессионного анализов для изучения взаимоотношений ряда компонентов верхнеплиоценовых отложений Индийского океана // Геохимия. 2021. Т. 66, № 2. С. 114–126.
- Ульянцев А.С., Прокуда Н.А., Стрельцова Е.А. и др. Геохимическая типизация органического вещества донных отложений по молекулярному составу предельных алифатических углеводородов // Океанология. 2021а. Т. 61, № 5. С. 822–830.
- 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. 2021б. Т. 61, № 4. С. 666–668.
- Folk R. L., Ward W. Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters // Journal of Sedimentary Petrology. 1957. Vol. 27(1). P. 3–26.
- Krumbein W. C. Size frequency distributions of sediments // Journal of Sedimentary Petrology. 1934. Vol. 2(4). P. 65–77.
- Schirrmeister L., Grosse G., Schwamborn G., et al. Late Quaternary History of the Accumulation Plain North of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A Multidisciplinary Approach // Polar Geography. 2003. Vol. 27(4). P. 277–319.
- Strauss J., Schirrmeister L., Wetterich S., et al. Grain-size properties and organic-carbon stock of Yedoma Ice Complex permafrost from the Kolyma lowland, northeastern Siberia // Global Biogeochem. Cycl. 2012. Vol. 26. GB3003.
- Ulyantsev A.S. Comparative Analysis of Mineral Assemblages in Bottom Sediments from Buor-Khaya Bay // Oceanology. 2024. Vol. 64. P. 104–121.
- Ulyantsev A.S., Streltsova E.A., Charkin A.N. Lithological and granulometric data for the upper sedimentary layer of the Chaun Bay, East Siberian Sea // Data in Brief. 2023. Vol. 46. 108813.
- Ulyantsev A.S., Streltsova E.A., Charkin A.N. Grain size properties of surface bottom sediments from the Chaun Bay // Oceanology. 2024. Vol. 64. P. 446–461.
- Wentworth C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments // The Journal of Geology. 1922. Vol. 30 (5). P. 377–392.

Статья поступила в редакцию 28.03.2025,
одобрена после рецензирования 23.05.2025,
принята к публикации 30.10.2025