

УДК 550.8.01. 550.85

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ТИПОВ СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПО ГЛУБИНЕ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Кирилл Владимирович Сыромятников¹, Руслан Рустемович Габдуллин²✉

¹ Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия;

Sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-8798-4425>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

Gabdullin@fgp.msu.ru

Аннотация. Продемонстрированы возможности методов статистического анализа на примере изучения современных донных осадков западной части Баренцева моря. В результате проведения кластерного и дисперсионного анализов установлены закономерности распределения гранулометрических типов современных донных осадков и концентрации в них органического углерода с глубиной в пределах сублиторальной и батимальной зон моря. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что распределение осадков по размерности обусловлено механической дифференциацией осадочного материала по мере его транспортировки морскими течениями, а также расстоянием от основных источников сноса — Новой Земли, Кольского п-ова и Шпицбергена. При этом аккумуляция органического углерода в донных осадках была связана с особенностями распределения сообществ морских организмов в пределах рассмотренных фациальных зон. Высокое содержание органического углерода в батимальной зоне моря было связано с увеличением здесь первичной продуктивности, а также с переносом морскими течениями накопленного биогенного материала литеральной и сублиторальной зон в сторону батии.

Ключевые слова: донные осадки Баренцева моря, фации Баренцева моря, дисперсионный анализ, кластерный анализ, гранулометрические типы осадков, западная часть Баренцева моря

Для цитирования: Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р. Закономерности распределения гранулометрических типов современных донных осадков и органического углерода по глубине в западной части Баренцева моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 51–61.

REGULARITIES OF DISTRIBUTION OF PARTICULATION TYPES OF MODERN BOTTOM SEDIMENTS AND ORGANIC CARBON BY DEPTH IN THE WESTERN PART OF THE BARENTS SEA

Kirill V. Syromyatnikov¹, Ruslan R. Gabdullin²✉

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia;

Sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-8798-4425>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Gabdullin@fgp.msu.ru

Abstract. In this article, the possibilities of statistical analysis methods were demonstrated on the example of studying modern bottom sediments in the western part of the Barents Sea. As a result of cluster and dispersion analyses, regularities in the distribution of granulometric types of modern bottom sediments and organic carbon dissolved in them with depth within the sublittoral and bathyal zones of the sea were established. Based on the results obtained, it was concluded that the size distribution of sediments was due to the mechanical differentiation of sedimentary material as it was transported by sea currents, as well as the distance from the main sources of drift — Novaya Zemlya, the Kola Peninsula and Svalbard. At the same time, the accumulation of organic carbon in bottom sediments was associated with the peculiarities of the distribution of communities of marine organisms within the considered facies zones. The high content of organic carbon in the bathyal zone of the sea was associated with an increase in primary productivity here, as well as with the transfer by sea currents of the accumulated biogenic material of the littoral and sublittoral zones towards the bathyal.

Key words: bottom sediments, sediments of the Barents Sea, facies of the Barents Sea, analysis of variance, cluster analysis, granulometric types of sediments, western part of the Barents Sea

For citation: Syromyatnikov K.V., Gabdullin R.R. Regularities of distribution of particulation types of modern bottom sediments and organic carbon by depth in the western part of the Barents sea. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 4: 51–61. (In Russ.).

Введение. Исследование процессов седиментации в морях и океанах необходимо проводить на основе изучения химического, минерального и гранулометрического состава осадков, сформировавшихся в различных фациальных условиях.

При этом количество данных для всестороннего изучения процесса осадконакопления обычно ограничено. В этом случае на помощь приходят методы

статистического анализа, которые позволяют проводить детальные исследования с использованием относительно небольшого количества признаков, рассматриваемых при описании осадков различных фациальных обстановок. Например, нами на основе проведения кластерного и дисперсионного анализов была обнаружена закономерность распределения гранулометрического состава современных донных осадков и концентрации в них органического углерода для западной части Баренцева моря в зависимости от глубины морского бассейна. При изучении морских фаций исследуемого региона были проанализированы такие факторы, как удаленность от береговой линии основных источников сноса осадочного материала, глубина морского бассейна и характер распределения живых организмов. Благодаря новым данным, полученным с помощью при-

менения статистических анализов, удалось выявить главные особенности процесса осадконакопления для западной части Баренцева моря на количественном уровне. На основе обнаруженной зависимости размерности осадков и сконцентрированного в них органического углерода от глубины морского бассейна стало возможно оценить их соотношение в пределах рассмотренных фациальных зон этого региона.

Баренцево море — окраинное море Северно-Ледовитого океана. Оно ограничено северным побережьем Европы и архипелагами Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля (рис. 1). Баренцево море расположено в пределах материковой отмели. Максимальная глубина моря составляет 600 м. У поверхностных течений морского бассейна наблюдается круговорот против часовой стрелки.

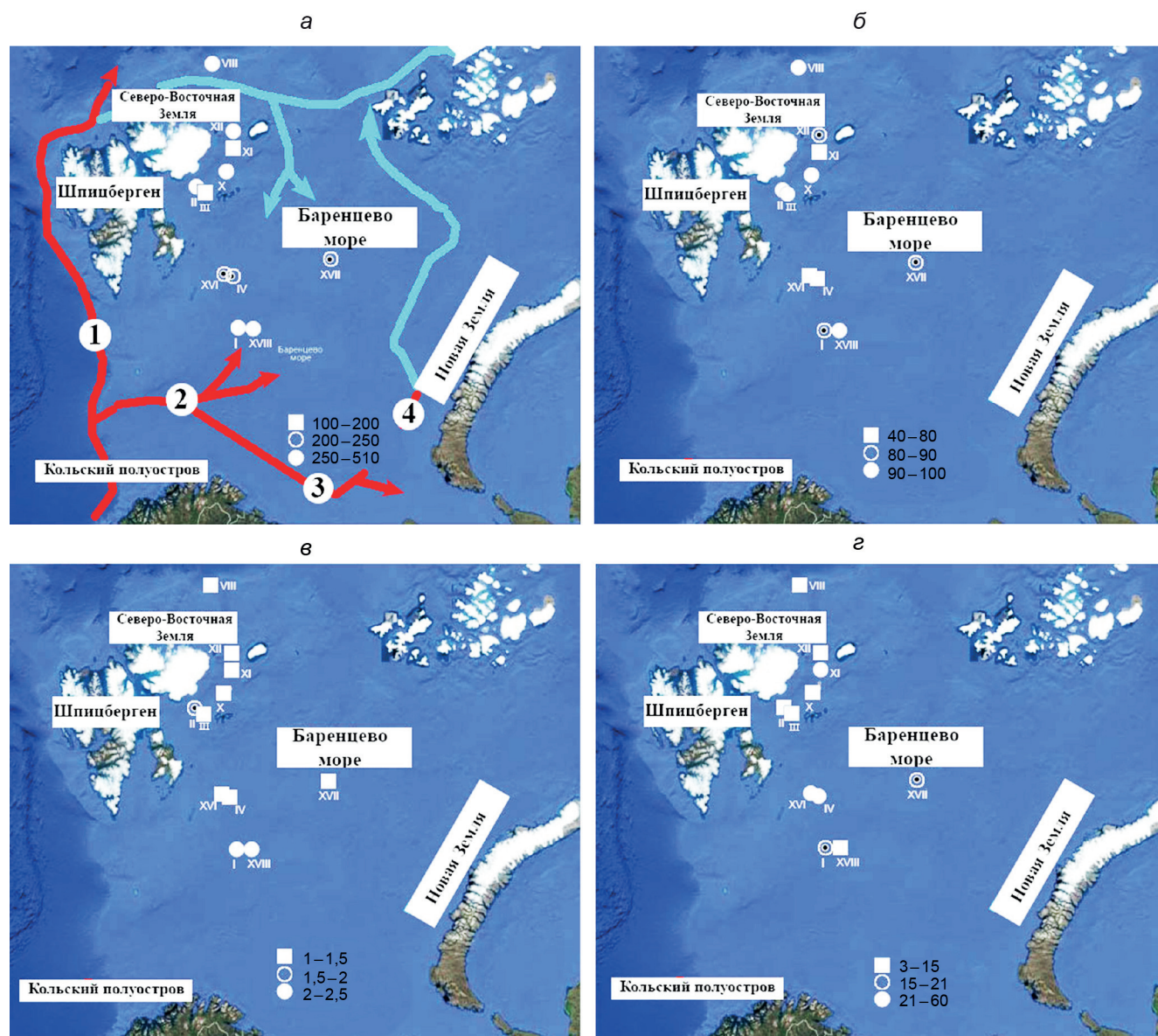


Рис. 1. Схематическая карта расположения исследуемых станций (табл. 1). Схематично показано направление течений: 1 — Шпицбергенское течение; 2 — Нордкапское течение; 3 — Мурманское течение; 4 — Новоземельское течение. Приведены данные для каждой станции: а — глубина; б — содержание суммы глинистой и алевритовой фракций; в — среднее содержание органического углерода; z — содержание суммы гравийной и песчаной фракции

Таблица 1

Положение исследуемых станций и способы отбора проб, по [Carroll et al., 2008]

Стан-ции	Широта, долгота	Место отбора проб	Пробо-отбор-ник	Глуби-на, м	Пелит+алеверит (0–1 см), %	Гравий+песок (0–1 см), %	$C_{\text{орг.макс}}$ (0–10 см), %	$C_{\text{орг.мин}}$ (0–10 см), %	$C_{\text{орг.ср}}$ (0–10 см), %
I	75°40, 30°10	Желоб острова Надежды	МС	345	80	20	2.38	1.92	2.15
II	79°03, 25°37	Южная часть Земли Короля Карла		320	94	6	1.61	1.45	1.53
III	79°01, 25°46	Окончание трога Эрика Эриксона		198	92	8	1.39	1.19	1.29
IV	77°01, 29°29	Банка Хопен		222	54	46	1.4	1	1.2
VIII	81°20, 27°19	Северная часть Квитейского трога		503	97	3	1.62	1.32	1.47
X	79°22, 28°42	Северная часть Земли Короля Карла		303	94	6	1.32	1.13	1.225
XI	79°49, 29°44	Северо-восточная часть Земли Короля Карла		195	67	33	1.25	1.02	1.135
XII	80°09, 29°36	Центральная часть Квитейско-го трога	ВС	286	86	14	1.54	1.3	1.42
XVI	77°05, 28°33	Северная часть котловины Хопен	МС	206	42	58	1.45	1.45	1.45
XVII	77°26, 40°18	Восточный Сторбанкен	ВС	208	81	19	1.28	0.95	1.115
XVIII	75°40, 31°49	Желоб острова Надежды	ВС	340	97	3	2.61	2.25	2.43

Примечания. Способы отбора проб: МС — мультикорер, ВС — бокс-корер, а также содержание в % от суммы пелита и алеверита, сумма гравия и песка, в интервале от 0 до 1 см. Содержание $C_{\text{орг.макс}}$ — максимальное содержание органического углерода в осадках, в интервале от 0 до 10 см; $C_{\text{орг.мин}}$ — минимальные содержания органического углерода в осадках в интервале от 0 до 10 см; $C_{\text{орг.ср}}$ — среднее содержание органического углерода в осадках в интервале от 0 до 10 см.

Для северной и западной частей морского бассейна характерен круговорот местных и арктических вод Карского моря и Северного Ледовитого океана. В центральной части моря существует система круговых течений. В южной и восточной периферии моря воды движутся на восток и север. При этом теплые атлантические воды Нордкапского течения движутся с юга по восточной периферии в сторону восточной и северной частей моря. Влияние этого течения характерно вплоть до северных берегов Новой Земли (рис. 1, а).

Отметим, что Баренцево море богато растительным и животным планктоном, а также бентосом и различными видами рыб.

Изучение пространственной и временной изменчивости содержания органического углерода и другого биогенного материала как в вертикальном разрезе, так и на площади Баренцева моря посвящено множество работ [Агатова, 2017; Кодрян и др., 2017; Политова и др., 2019; Pogodina, 1994; Reigstad et al., 2008; Romankevich, 2004; Romankevich et al., 2017; Vetrov et al., 2006; Wassmann et al., 2006; Wassmann, Slagstad, 1993]. Кроме того, в водах и донных осадках Баренцева моря проанализировано содержание углеводородов [Немировская, 2020]. Как известно,

концентрация $C_{\text{орг}}$ в осадках связана с разложением накопленного в них органического вещества. В современных отложениях западной части Баренцева моря биогенный материал в основном сформировался благодаря жизнедеятельности морских организмов. В некоторых научных исследованиях приводятся подробные данные о распределении планктонных и бентосных сообществ в Баренцевом море [Carroll et al., 2008a, b; Hodal, Kristiansen, 2008; Piepenburg et al., 1995; Renaud et al., 2008].

Исследование гранулометрических типов осадков и процессов седиментогенеза для различных фациальных обстановок Баренцева моря проведено ранее в работах [Алексеева и др., 2020; Гуревич, 2002; Котенев, 1979; Лаврушин и др., 1990; Левитан и др., 2007; Система..., 2021; Тарасов, 1988; Zaborska et al., 2008]. В дополнение к этому отметим, что в работе [Маслов и др., 2020] выполнен детальный анализ редких и рассеянных элементов в современных донных осадках Баренцева моря.

Изучение распределения гравийно-песчаных, пелито-алеверитовых осадков, а также концентрации в них $C_{\text{орг}}$ (табл. 1, рис. 1) в западной части Баренцева моря позволяет сделать вывод о их закономерном распределении по глубине. При этом в

литоральной и сублиторальной зонах наблюдается широкое распространение гравийно-песчаных осадков, а содержание в них $C_{орг}$ несколько понижено и увеличивается лишь в сторону батии. В такой морской обстановке заметно возрастает количество пелитово-алевритовых осадков и резко уменьшается содержание гравийно-песчаных отложений.

Материалы и методы исследований. Пробы современных донных осадков были отобраны с помощью мультикореров и бокс-кореров ($0,25 \text{ м}^2$) на 11 станциях (табл. 1, рис. 1) в направлении с юга на север на участке от 75° до 81° с. ш. в западной части Баренцева моря (рис. 1). Фактическим материалом для проведения исследований послужили данные, приведенные в табл. 1 [Carroll et al., 2008].

Для изучения закономерности распределения гранулометрических типов осадков и концентрации в них $C_{орг}$ по глубине выполнен кластерный анализ по методу Уорда. Отметим, что исследования с применением кластерного анализа широко используются при изучении различных морских осадков. В частности, в качестве примера можно привести работу по анализу химического состава поверхностного слоя донных осадков Белого моря [Кузьмина и др., 2009]. Как известно, кластерный анализ применяется для разбиения исследуемых объектов по их сходству на однородные группы, или кластеры, с учетом определенных признаков.

При кластерном анализе по методу Уорда выделяются кластеры исследуемых объектов на основе таких показателей, как распределение по глубине суммарного содержания алевритовой и пелитовой, гравийной и песчаной фракций, а также $C_{орг}$. Метод Уорда предполагает, что изначально каждый кластер состоит из одного объекта. Сначала объединяются два ближайших кластера. Для них определяются средние значения каждого признака и рассчитывается сумма квадратов отклонений:

$$V_l = \sum_i \sum_j (x_{ij} - x_{jl})^2,$$

где l — номер кластера; i — номер объекта ($i = 1, 2, \dots, n_l$); n_l — количество объектов в l -м кластере; j — номер показателя ($j = 1, 2, \dots, k$); k — количество показателей, характеризующих каждый объект. В результате объединяются кластеры, соответствующие наименьшему приращению величины V_l .

В качестве меры сходства был применен квадрат евклидова расстояния, который измеряется в условных единицах:

$$\rho_k(x_i, x_j) = \sum_l (x_{il} - x_{jl})^2,$$

где x_i, x_j — координаты i -го и j -го объектов в k -мерном пространстве; $x_{il} - x_{jl}$ — величина l -й компоненты у i -го (j -го) объекта ($l = 1, 2, \dots, k$; $i, j = 1, 2, \dots, n$).

Для изучения тенденции распределения гранулометрических типов осадков и среднего содержания $C_{орг.ср}$ по глубине применялся однофакторный дисперсионный анализ — метод ANOVA, проверя-

ющий влияние на зависимую переменную одной независимой переменной [Иванов, 2005].

Метод однофакторного дисперсионного анализа используется в случаях, когда исследуются изменения результирующего признака под влиянием изменяющихся условий или градаций какого-либо фактора. Однофакторный дисперсионный анализ применялся ранее при изучении зависимости цвета донных осадков в южной части поднятия Менделеева и на континентальном склоне Восточно-Сибирского моря в зависимости от величины отношения Mn/Al [Левитан и др., 2014]. Кроме того, дисперсионный анализ успешно использовался для исследования взаимоотношений ряда компонентов верхнеплиоценовых отложений в Индийском океане [Сыромятников, Левитан, 2021].

Результаты исследований и их обсуждение.

Кластерный анализ суммарного содержания пелитовой и алевритовой фракций по глубине позволил выделить два кластера. Первый включает 8 станций, а второй — 3 станции (табл. 2, 5, рис. 2, 5). При этом для центроида первого кластера характерно среднее содержание суммы пелита и алеврита, равное 90,13%, что отвечает среднему значению глубины 312,9 м, а для центроида второго кластера — 54,33% и 207,7 м соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Результаты кластерного анализа по суммарному распределению пелита и алеврита в зависимости от глубины

Кластер	Число образцов	%	Центроиды	
			пелит+алеврит, %	глубина, м
1	8	72,7	90,13	312,9
2	3	27,3	54,33	207,7

На дендрограмме, приведенной на рис. 2, видна иерархическая структура группировки образцов по глубине на основе данных о суммарном содержании пелита и алеврита, а также глубины. В этом случае можно рассматривать разделение образцов на два кластера (рис. 2, табл. 2, 3) на основе различия в евклидовом расстоянии, которое приводится в условных единицах (у.е.).

Диаграмма рассеивания (рис. 3) показывает, как группируются исследуемые кластеры на плоскости в зависимости от двух переменных — суммы содержания пелита и алеврита и глубины. Каждый кластер представлен на диаграмме собственным символом и цветом. Из анализа графика следует, что первый кластер объединяет данные с более высокими суммарными значениями содержания пелита и алеврита, которым соответствуют большие значения глубины, а второй — со значительно меньшими суммами содержания пелита и алеврита и меньшей глубиной.

Для более детального изучения распределения пелитово-алевритовых осадков в западной части Баренцева моря был применен однофакторный дисперсионный анализ. Этим методом определяют

Рис. 2. Дендрограмма результатов кластерного анализа распределения суммы пелита и алеврита в зависимости от глубины

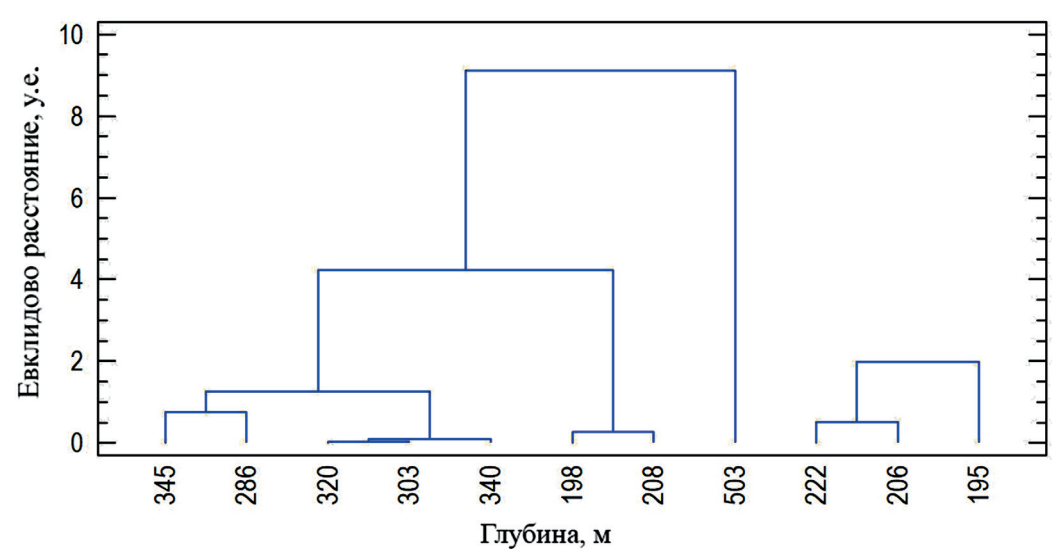
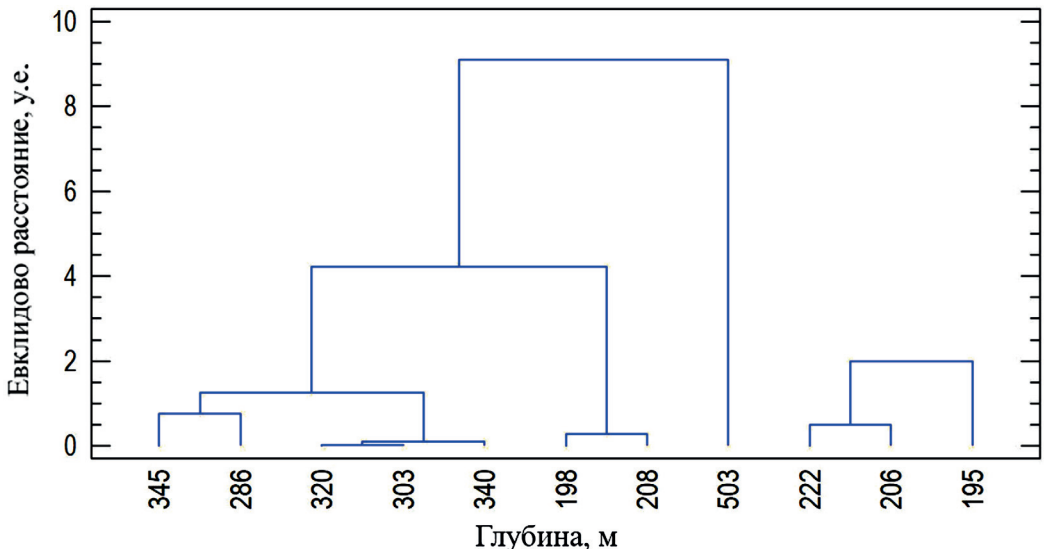


Рис. 3. Дендрограмма результатов кластерного анализа распределения суммы гравия и песка в зависимости от глубины



соотношения систематической (межгрупповой) дисперсии к случайной (внутригрупповой) дисперсии в измеряемых данных. В качестве оценки изменчивости используется сумма квадратов отклонения значений показателя от среднего (SS). При этом общая сумма квадратов раскладывается на межгрупповую сумму квадратов и внутригрупповую сумму квадратов:

$$SS_{\text{общ}} = SS_{\text{мг}} + SS_{\text{вг}}$$

где $SS_{\text{общ}}$ — общая сумма квадратов; $SS_{\text{мг}}$ — межгрупповая сумма квадратов; $SS_{\text{вг}}$ — внутригрупповая сумма квадратов.

Метод ANOVA был выполнен на основе выделенных кластеров распределения суммарного содержания пелита и алеврита по глубине. При этом кластеры были изменены таким образом, чтобы средняя большая глубина (312,9 м) и большее значение суммы пелита и алеврита (90,13%) соответствовали второму кластеру, а меньшие средние значения глубины (207,7) и суммы алеврита и пелита (54,33%) — первому кластеру (табл. 3). В результате определена

Таблица 3

Данные о принадлежности наблюдений к определенным кластерам на основе данных о суммарном содержании пелита и алеврита в зависимости от глубины моря

Станция	Глубина, м	Пелит+алеврит, %	Кластеры
I	345	80	2
II	320	94	2
III	198	92	2
IV	222	54	1
VIII	503	97	2
X	303	94	2
XI	195	67	1
XII	286	86	2
XVI	206	42	1
XVII	208	81	2
XVIII	340	97	2

Примечание. Значение кластеров поменяли местами.

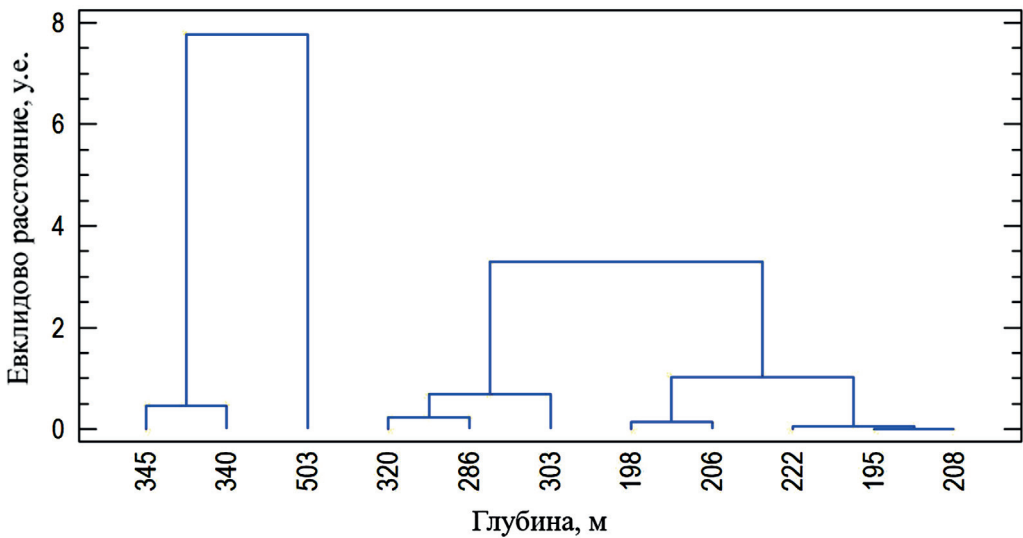


Рис. 4. Дендрограмма результатов кластерного анализа распределения суммы гравия и песка в зависимости от глубины

значимость влияния фактора морской обстановки в зависимости от глубины — от сублиторальной зоны в сторону батiali. Здесь отмечается рост суммарного содержания пелита и алеврита от 54,33 до 90,13%, а значения средних глубин составляют 207,7 м и 312,9 м соответственно. Результаты однофакторного дисперсионного анализа показывают разложение дисперсии суммарного содержания пелита и алеврита на две компоненты — межгрупповую и внутригрупповую (табл. 4). При этом отношение межгрупповой оценки и внутригрупповой оценки (по критерию Фишера, F) составляет 39,09 (табл. 4). На статистическую значимость различий между содержанием суммы пелита и алеврита в зависимости от принадлежности осадков к определенному кластеру, в данном случае от глубины (рис. 4), указывает вероятность ошибки (P -значение) по критерию Фишера: $P \leq 0,05$ с достоверностью 95% (табл. 4).

Результаты кластерного анализа по суммарному содержанию гравия и песка в зависимости от глубины по методу Уорда позволил выделить два кластера. Первый включает 8 станций, а второй — 3 станции (табл. 5, 6, рис. 5, 6). Отметим на основе данных о центроидах первого и второго кластеров (табл. 5),

Таблица 4

Результаты дисперсионного анализа по суммарному распределению алеврита и пелита по глубине

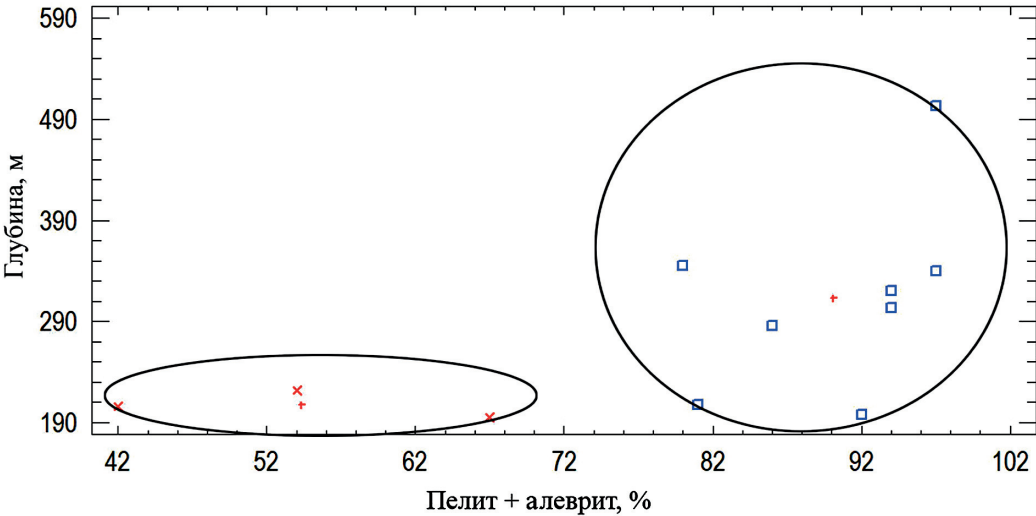
Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Средние квадраты	F -отношение	P -значение
Между группами	2795	1	2795	39,09	0,0001
Внутри групп	643,55	9	71,51		
Общая	3438,55	10			

что начиная со средней глубины 207,7 м, соответствующей сублиторальной зоне, в сторону батиаль-

Таблица 5

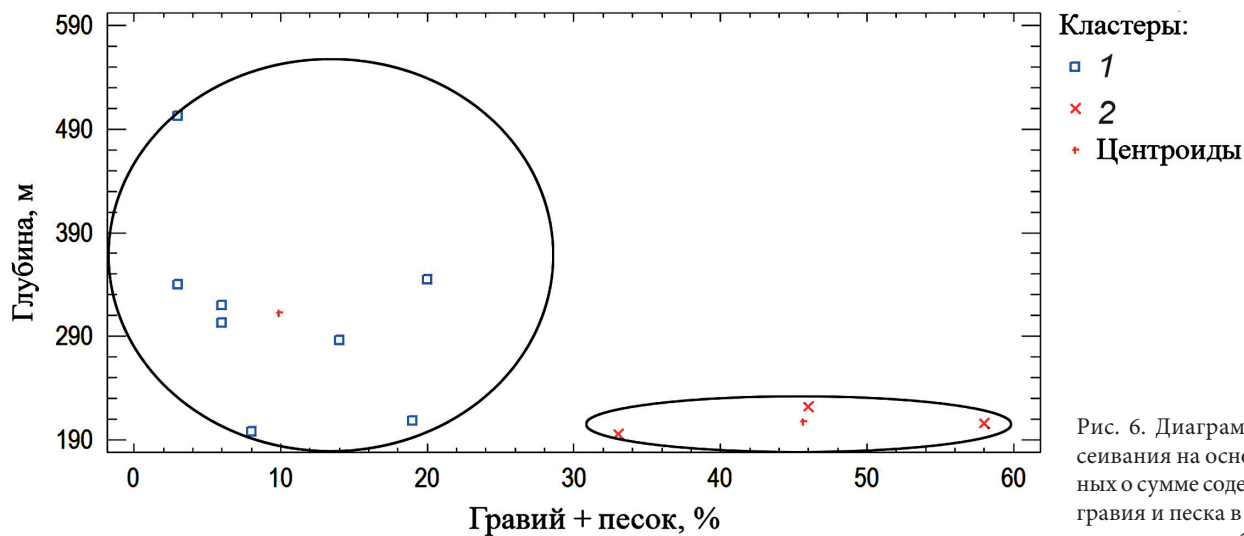
Результаты кластерного анализа по суммарному распределению гравия и песка по глубине

Кластер	Число образцов	%	Центроиды	
			гравий+песок (%)	глубина, м
1	8	72,7	9,9	312,9
2	3	27,3	45,7	207,7



Кластеры:
□ 1
× 2
+ Центроиды

Рис. 5. Диаграмма рассеивания на основе данных суммы содержания пелита и алеврита по глубине



ной зоны (312,9 м) происходит резкое уменьшение содержания суммы гравия и песка от 45,7 до 9,9%.

На приведенной дендрограмме (рис. 5) можно наблюдать, как группируются образцы на основе данных о суммарном содержании гравия и песка, а также о глубине морского бассейна. В результате отчетливо видно разбиение на два кластера на основе различия в евклидовом расстоянии. При этом результаты совпадают с данными о суммарном содержании пелита и алевроита. Это объясняется тем, что в рассматриваемой двухкомпонентной системе суммарное содержание гравия и песка, а также пелита и алевроита составляет 100%. При этом данные кластерного анализа существенно отличаются по значениям среднего суммарного содержания пелита и алевроита, а также гравия и песка на одном и том же интервале глубины — от 207,7 до 312,9 м (табл. 5).

Диаграмма рассеивания (рис. 6) отображает исследуемые кластеры на плоскости в зависимости от двух переменных — суммарного содержания гравия и песка и глубины морского бассейна. Первый кластер объединяет данные со значительно меньшими значениями суммарного содержания гравия и песка (9,9%), которым соответствуют повышенные значения глубины батимальной зоны (312,9 м), а второй отличается высокими значениями содержания суммы гравия и песка, но при этом меньшими значениями глубины, характерными для сублиторальной зоны моря.

При проведении ANOVA по изучению распределения суммарного содержания гравия и песка в зависимости от глубины морского бассейна значение кластеров были изменены таким образом, чтобы первому кластеру соответствовали меньшие значения глубины (207,7 м) и большее суммарное содержание гравия и песка (45,7%), а второму — большие значения глубины (312,9 м) и меньшее значение суммы гравия и песка, равное 9,9% (табл. 6). В результате анализа выявлено резкое уменьшение суммарного содержания гравия и песка при увеличении глубины морского бассейна от сублиторали (207,7 м) в сторону батии (312,9 м): от 45,7 до 9,9%,

Таблица 6
Данные о принадлежности наблюдений к определенным кластерам на основе данных о суммарном содержании гравия и песка в зависимости от глубины моря

Станции	Глубина, м	Гравий+песок, %	Кластеры
I	345	20	2
II	320	6	2
III	198	8	2
IV	222	46	1
VIII	503	3	2
X	303	6	2
XI	195	33	1
XII	286	14	2
XVI	206	58	1
XVII	208	19	2
XVIII	340	3	2

Примечание. Значение кластеров поменяли местами.

с уровнем достоверности 95%, на что указывает вероятность ошибки по критерию Фишера $F: P \leq 0,05$ (табл. 7, рис. 7).

Кластерный анализ распределения среднего содержания органического углерода ($C_{орг.ср}$) по глубине в исследуемом регионе позволил выделить два кластера (табл. 8, 9). Первый кластер включает 3 станции и объединяет данные с значениями $C_{орг.ср}$ и глубины, равными 2,02% и 396 м соответственно, что отвечает батимальной зоне морского бассейна. Второй кластер включает 8 станций и объединяет наблюдения со значениями $C_{орг.ср}$, равными 1,03%, со средними значениями глубины 242,3 м сублиторальной зоны моря.

На дендрограмме, приведенной на рис. 8, можно наблюдать разделение обоих выделенных кластеров по глубине и среднему содержанию $C_{орг.ср}$. Диаграмма рассеивания в данном случае (рис. 9) показывает, что исследуемые кластеры на плоскости сгруппиро-

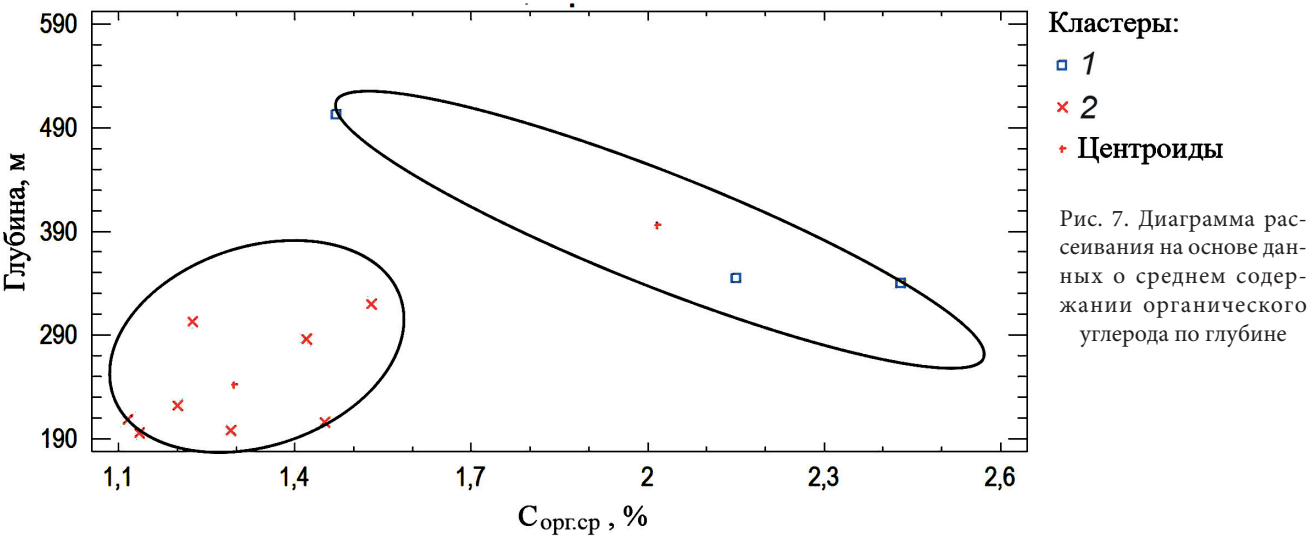


Таблица 7

Результаты дисперсионного анализа по суммарному
распределению гравия и песка по глубине

Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Средние квадраты	F-отно- шение	P-зна- чение
Между группами	2795	1	2795	39,09	0,0001
Внутри групп	643,55	9	71,51		
Общая	3438,55	10			

Таблица 8

Результаты кластерного анализа по распределению
среднего содержания органического углерода ($C_{орг.ср}$)
в зависимости от глубины

Кластер	Число образцов	%	Центроиды	
			$C_{орг.ср}$, %	Глубина, м
1	3	27,3	2,02	396
2	8	72,7	1,3	242,3

Таблица 9

Данные о принадлежности наблюдений к определенным
кластерам на основе данных о среднем содержании
органического углерода $C_{орг.ср}$, %

Station	Depth	$C_{орг.ср}$, %	Кластеры
I	345	2,15	2
II	320	1,53	1
III	198	1,29	1
IV	222	1,2	1
VIII	503	1,47	2
X	303	1,225	1
XI	195	1,135	1
XII	286	1,42	1
XVI	206	1,45	1
XVII	208	1.115	1
XVIII	340	2,43	2

Примечание. Значение кластеров поменяли местами.

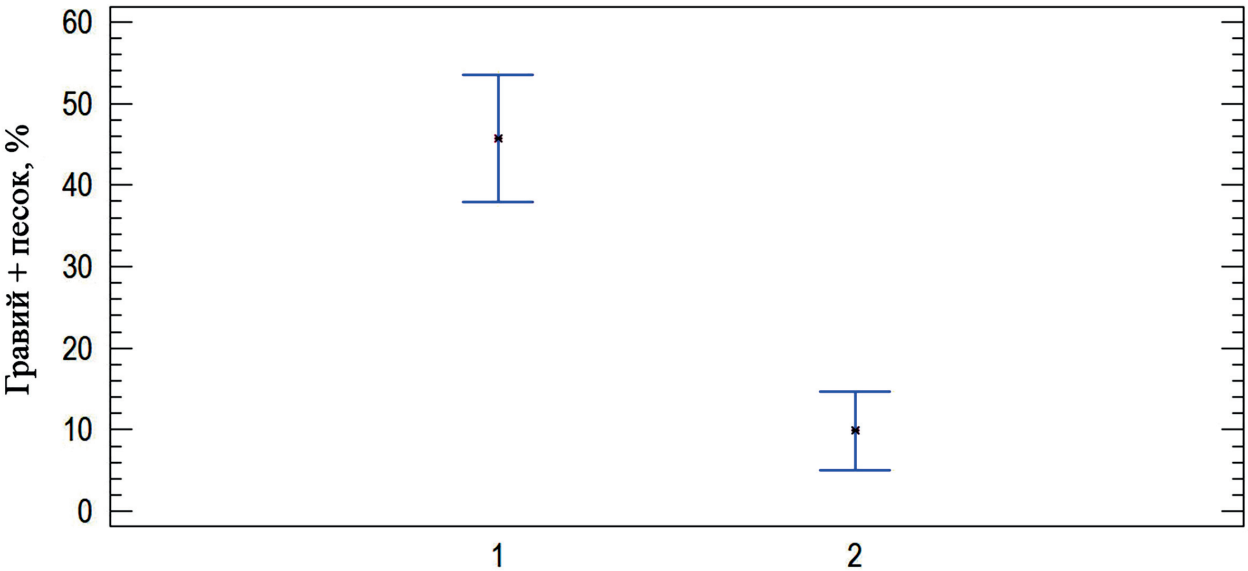


Рис. 8. Средние и 95%-ные доверительные интервалы распределения суммы пелита и алеврита (в % по оси абсцисс): 1 — зона
сублиторали (207,7 м); 2 — зона батииали (312,9 м)

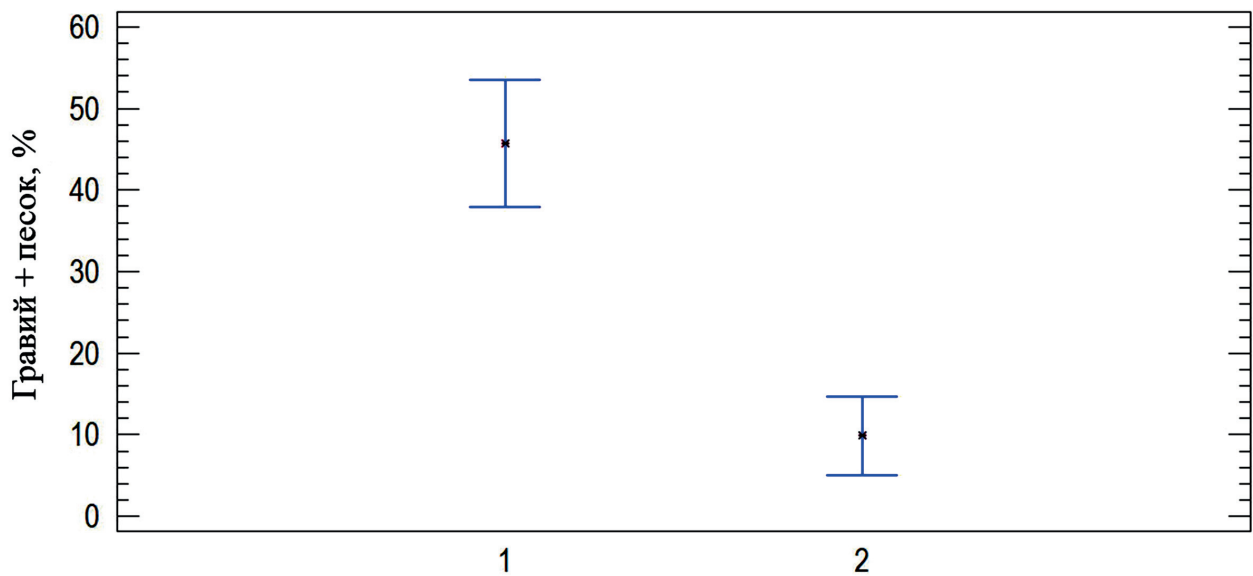


Рис. 9. Средние и 95%-ные доверительные интервалы распределения суммы гравия и песка (в % по оси абсцисс): 1 — зона сублиторали (207,7 м); 2 — зона батиали (312,9 м)

ваны в зависимости от двух переменных — среднего содержания органического углерода и глубины морского бассейна.

В результате применения ANOVA на основе выделенных кластеров установлена закономерность распределения $C_{орг.ср}$ в зависимости от глубины морского бассейна в изученном регионе.

В рассматриваемом случае наблюдается разложение дисперсии по среднему содержанию $C_{орг.ср}$ на два компонента — межгрупповой и внутригрупповой (табл. 10). При этом F -отношение составляет 15,60 и представляет собой отношение межгрупповой оценки к внутригрупповой. Закономерность увеличения $C_{орг.ср}$ с 1,3 до 2,02% на участке со средней глубиной от 242,3 м в зоне сублиторали в сторону батиальной зоны (до 396 м) определена с достоверностью 95%, что отвечает вероятности ошибки (значению P) менее 0,05 (табл. 10, рис. 10).

Заключение. Таким образом, в результате проведения кластерного и дисперсионного анализов обнаружена закономерность распределения гравийно-песчаных, пелитово-алевритовых осадков, а также сконцентрированного в них органического углерода.

Отметим, что повышенное содержание суммы гравия и песка характерно для литоральной и су-

блиторальной зон моря, уменьшение содержания в 4,6 раза происходит в сторону батиальной зоны. При этом средняя глубина составляет 312,9 м. В отличие от материала гравийно-песчаной размерности, пелито-алевритовые осадки имеют высокую концентрацию в батиальной зоне, она снижается в сублиторальной зоне в западной части Баренцева моря. При этом наблюдается рост суммарного содержания пелита и алеврита в 1,65 раза от сублиторали в сторону батиали.

Подчеркнем, что характер накопления гравийно-песчаных и пелитово-алевритовых осадков в исследуемом регионе обусловлен механической дифференциацией осадочного материала при его транспортировке морскими течениями от основных источников сноса, характерных для этого региона — Новой Земли, Кольского п-ова, Шпицбергена — к областям разгрузки. В исследуемом регионе главные поставщики терригенного материала, помимо един-

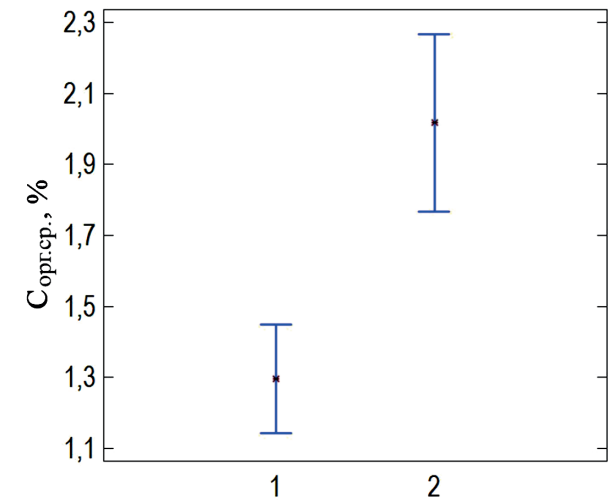


Рис. 10. Средние и 95%-ные доверительные интервалы распределения среднего содержания $C_{орг.ср.}$ (в % по оси абсцисс): 1 — зона сублиторали (242,3 м); 2 — зона батиали (396 м)

Таблица 10

Результаты дисперсионного анализа
о распределении $C_{орг.ср}$ по глубине

Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Средние квадраты	F -отношение	P -значение
Между группами	1,13	1	1,13	15,60	0,003
Внутри групп	0,65	9	0,07		
Общая	1,78	10			

ственной питающей артерии — р. Печора — морские течения, основное из которых здесь теплое Нордкапское течение со стороны Атлантического океана (рис. 1, а). Кроме того, дополнительным источником поступления гравийно-песчаного материала в осадки Баренцева моря служили морские льды [Elverhøi, Solheim, 1989]. При этом область распространения морского льда в Баренцевом море характерна в основном для зон литорали и сублиторали, где и были обнаружены повышенные значения концентрации гравия и песка.

Увеличение концентрации $C_{орг}$ в осадках батимальной зоны в рассматриваемом регионе связано с повышенной здесь первичной продуктивностью. Как известно, Баренцево море имеет высокую биопродуктивность по сравнению с другими морями аналогичного происхождения. Здесь широко распространен фитопланктон, который питает зоопланктон и имеет определенные области скопления. Увеличение концентрации $C_{орг}$ в зоне батии связано с транспортировкой биогенного материала морскими течениями от зон литорали и сублиторали [Астахов и др., 2013], что подтверждают результаты проведенных исследований. Кроме того, наблюдается зависимость концентрации $C_{орг}$ от размерности осадков. Максимальные значения его содержания характерны для пелитово-алевритовых отложений. Это подтверждается приблизительно одинаковым увеличением концентрации пелитово-алевритовых

осадков в 1,65 раза и $C_{орг}$ в 1,6 раза в сторону батии морского бассейна. Глинистые минералы, как известно, обладают высокой дисперсностью, что активизирует физико-химические процессы и химические реакции. Поэтому пелитово-алевритовые осадки обладают лучшей адсорбционной активностью, в том числе органических веществ, по сравнению с гравийно-песчаными [chem21.info/info/1634368/].

Заметим, что осадконакопление в различных морских обстановках может существенно отличаться. Основные факторы, которые влияют на процессы седиментации, в каждой конкретной обстановке могут отличаться не только по природе, но и по доле участия каждого из них. Необходимо учитывать весь комплекс физико-географических, биологических, химических и историко-геологических процессов при изучении различных фациальных зон морских бассейнов. В проведении научных исследований, связанных с выявлением основных факторов, участвующих в осадочном процессе, и установлением доли их участия успешно помогают методы математической статистики.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Математические методы анализа сложных систем».

Участие К.В. Сыромятникова финансово поддержано в рамках госзаказа ГЕОХИ РАН № 137-2019-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агатова А.И. Органическое вещество в морях России. М.: ВНИРО, 2017. 257 с.
- Алексеева Т.Н., Политова Н.В., Козина Н.В. Гранулометрический состав поверхностного слоя донных осадков Баренцева моря // *Океанология*. 2020. Т.60, № 6. С. 915–929.
- Астахов А.С., Гусев Е.А., Колесник А.Н., Шакиров Р.Б. Условия накопления органического вещества и металлов в донных осадках Чукотского моря // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54, № 9. С. 1348–1365.
- Гуревич В.И. Современный седиментогенез и геоэкология Западно-Арктического шельфа Евразии. М.: Научный мир, 2002. 134 с.
- Иванов О.В. Статистика. Учебный курс для социологов и менеджеров. Ч. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 224 с.
- Кодрян К.В., Торгунова Н.И., Агатова А.И. Растворенное и взвешенное органическое вещество в период изменчивости ледового покрова Баренцева моря // *Тр. ВНИРО*. 2017. Т. 169. С. 191–203.
- Копелевич О.В., Артемьев В.А., Глуховец Д.И. Оценка биогеохимических характеристик поверхностного слоя вод Баренцева моря летом 2017 г. по оптическим данным // *Геология морей и океанов*. М.: Изд-во ИО РАН, 2017. № 4. С. 87–91.
- Котенев Б.Н. К палеогеографии Баренцева моря в позднеледниковье и голоцене // *Позднечетвертичная история и седиментогенез окраинных и внутренних морей*. М.: Наука, 1979. С. 20–27.
- Кузьмина Т.Г., Леин А.Ю., Лучшева Л.Н. и др. Химический состав поверхностного слоя донных осадков Белого моря // *Литология и полезные ископаемые*. 2009. № 2. С. 115–132.
- Лаврушин Ю.А., Алексеев В.В., Чистякова И.А., Хасанкаев В.Б. Типы осадков и эволюция обстановок осадконакопления Баренцева моря в поздне- и послеледниковое время // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1990. № 2. С. 82–90.
- Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 403 с.
- 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., Политова Н.В., Козина Н.В. и др. Редкие и рассеянные элементы в современных донных осадках Баренцева моря // *Литология и полезные ископаемые*. 2020. № 1. С. 3–27.
- Немировская И.А. Углеводороды в водах и донных осадках Баренцева моря в период изменчивости ледового покрова // *Литология и полезные ископаемые*. 2020. Т. 65, № 7. С. 679–692.
- Политова Н.В., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Лохов А.С. Рассеянное осадочное вещество Баренцева моря // *Океанология*. 2019. Т. 59. С. 777–790.
- Система Баренцева моря / Гл. ред. А.П. Лисицын. М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
- 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.
- Тарасов Г.А. Особенности позднечетвертичной седиментации в Баренцевом море // *Четвертичная палеоэкология и палеогеография северных морей*. М.: Наука, 1988. С. 82–93.
- Carroll M.L., Denisenko S., Renaud P., Ambrose W. Benthic infauna of the seasonally ice-covered western Barents Sea: latitudinal

pattern sandrelationships to physical forcing // *Deep-Sea Res. II.* 2008a. Vol. 55. P. 2340–2351.

Carroll J., Zaborska A., Papucci C. et al. Accumulation of organic carbon in western Barents Sea sediments // *Deep-Sea Res. II.* 2008b. Vol. 55. P. 2361–2371.

Elverhøi A., Solheim A. The Barents Sea ice sheet — sedimentological discussion // *Polar Res.* 1983. Vol. 1, N 1. P. 23–41.

Hodal H., Kristiansen S. The importance of small-celled phytoplankton in spring bloom at the marginal ice zone in the northern Barents Sea // *Deep-Sea Res. II.* 2008. Vol. 55. P. 2176–2185.

Piepenburg D., Blackburn T.H., von Dorrien C.F. et al. Partitioning of benthic community respiration in the Arctic (North western Barents Sea) // *Marine Ecology-Progress.* 1995. Ser. 118. P. 119–213.

Pogodina I.A. Micropaleontological studies of Upper Quaternary sediments the Barents Sea // *Foraminifers of the Barents Sea (hydrobiology and Quaternary paleoecology).* Apatity: Publ. house of the KSC RAS, 1994. P. 71–83.

Reigstad M., Wexels Riser C., Lalande C. et al. Vertical export of carbon, phytoplankton and faecal pellets in the Arctic Barents Sea // *Deep-Sea Res. II.* 2008. Vol. 55. P. 2308–2319.

Renaud P., Morata N., Carroll M.L. et al. Pelagic-benthic coupling in the western Barents Sea: processes and time-scales // *Deep-Sea Res. II.* 2008. Vol. 55. P. 2372–2380.

Romankevich E.A., Korneeva G.A., Shevchenko V.P. et al. Suspended organic matter in Barents Sea // *Oceanography.* 2000. Vol. 40, N 2. P. 208–216.

Vetrov A., Romankevich E.A. The Barents Sea: distribution, sources, variability and burial of organic carbon // *The Organic Carbon cycle in the Arctic Ocean.* Berlin. Heidelberg: Springer, 1993. P. 266–278.

Wassmann P., Reigstad M., Haug T. et al. Food web and carbon flux in the Barents Sea // *Progress in Oceanography.* 2006. Vol. 71. P. 232–287.

Wassmann P., Slagstad D. Seasonal and annual dynamics of particulate carbon flux in the Barents Sea // *Polar Biology.* 1993. Vol. 13. P. 363–372.

Zaborska A., Carroll J., Papucci C. et al. Recent sediment accumulation rates for the western margin of the Barents Sea // *Deep-Sea Res. II.* 2008. Vol. 55. P. 2352–2360.

Статья поступила в редакцию 09.03.2022,
одобрена после рецензирования 12.07.2022,
принята к публикации 31.08.2022