

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2024 г. Е. А. Стрельцова*, Н. А. Беляев, В. Ю. Федулов, Е. М. Пушкарева

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

**e-mail: Alena.st@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.08.2023 г.

После доработки 04.10.2023 г.

Принята к публикации 16.11.2023 г.

Исследован верхний слой донных осадков северо-восточной части Карского моря. Показано, что в составе осадков преобладает алеврит, доля песка увеличивается по мере приближения к берегу. Содержание органического углерода (среднее значение — 1.1% масс.) близко к среднему содержанию в осадках Карского моря, увеличиваясь на глубоководных станциях. Выявленная линейная зависимость между содержанием органического углерода и площадью поверхности осадка показывает, что сорбция на поверхности частиц является преимущественной формой аккумуляции органического вещества (ОВ) в осадках. Средняя концентрация *n*-алканов в исследованных пробах — 1.1 мкг/г осадка, в спектре распределения доминируют нечетные высокомолекулярные гомологи терригенного происхождения.

Ключевые слова: гранулометрический состав, органический углерод, *n*-алканы, биомаркеры, донные осадки, Карское море, Арктика

DOI: 10.31857/S0030157424020117 **EDN:** RULYWH

Донные осадки Карского моря, включая состав и содержание в них органического вещества, сравнительно хорошо изучены в полярном регионе [14, 17]. Однако северо-восточная часть моря исследована недостаточно подробно по сравнению с эстуарными зонами и центральными районами моря. Ранее исследования проводились в основном в вышеуказанных областях и фокусировались на транспорте терригенного материала со стоком сибирских рек. Район желоба Воронина представляет особый интерес при исследовании процессов осадконакопления в шельфовых зонах, так как находится под наименьшим влиянием речного стока [9], но при этом подвержен воздействию как атлантических вод, так и вод центрально-арктического бассейна [16].

Целью работы являлось выявление возможных отличий в составе органического вещества (ОВ) осадков северо-восточной части Карского моря от состава ОВ осадков центральной части моря, вызванных повышенным влиянием центрального арктического бассейна на процессы осадконакопления, а также определение границ доминирования в осадках терригенного органического вещества, поступающего с речным стоком.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили образцы поверхностного слоя (0–1 см и 2–3 см) донных осадков, отобранные в 89-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (октябрь 2022 г.) на геологическом разрезе, выполненном в северо-восточной части Карского моря (рис. 1). Разрез приурочен к западной части желоба Воронина, отделенного от основного бассейна Карского моря обширной мелководной зоной. Станции разреза располагались в зоне глубин от 72 до 1652 м (табл. 1, рис. 2а), затрагивая как зону шельфа, так и область континентального склона.

Пробы поверхностного слоя донных осадков отбирались боксдорером “Бокс-5” с размерами пробоотборника 50 × 50 × 60 см. В кернах, отобранных из боксдорера с помощью пластиковой врезки диаметром 120 мм, стандартно выделялся верхний полужидкий слой, обводненный горизонт мощностью ~1 см, и далее колонка делилась на равные слои толщиной 1 см. Средний выход керна составлял 30 см. Граница окисленного и восстановленного слоя располагалась на горизонтах 5–40 см. В процессе отбора проводилось литологическое описание.

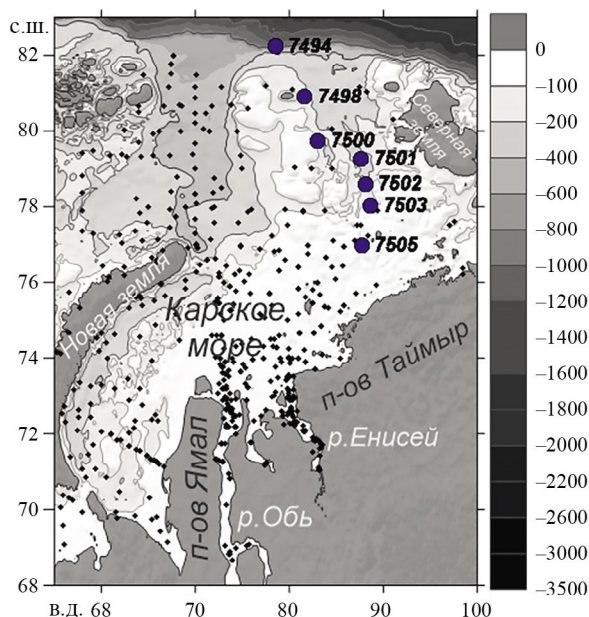


Рис. 1. Расположение станций пробоотбора (синие кружки). Черными ромбами показаны места определения содержания $C_{\text{орг}}$ в поверхностных слоях донных осадков.

Образцы для биогеохимических исследований замораживались немедленно после отбора, хранились и транспортировались в морозильной камере при -20°C до проведения лабораторных исследований. Пробы для литолого-минералогических исследований хранились и транспортировались при температуре 5°C герметично закрытыми. Процесс отбора, хранения и транспортировки образцов обеспечивал неизменность состава осадков в интервале между отбором проб и их анализом.

Определение гранулометрического состава основывалось на методике, принятой в АО ИО РАН [10], и включало две стадии: мокрую отситовку песчаной фракции и последующий приборный анализ алевро-пелитовой фракции. В качестве литологического деления была принята шкала: пелит (<2 мкм), алеврит (2–63 мкм), песок (>63 мкм) [20]. Параллельно гравиметрически определялась влажность образца.

После мокрой отситовки песчаная фракция крупнее 63 мкм высушивалась в течении трех дней при 60°C и подвергалась сухому рассеву на колонне сит с размером ячеек 2 мм, 1 мм, 500 мкм, 250 мкм, 125 мкм и последующему взвешиванию. Перед приборным анализом отситованная фракция диаметром менее 63 мкм выдерживалась в течение суток в дистиллированной воде с добавлением раствора гексаметафосфата натрия ($0.7\% \text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$). Непосредственно перед анализом про-

ба подвергалась диспергированию в ультразвуковой ванне.

Приборный анализ алевро-пелитовой фракции проводился на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SHIMADZU SALD 2300. Для проведения измерения в проточную ячейку лазерного анализатора вводилось необходимое количество (2–3 мл) предварительно подготовленной суспензии. В анализаторе проба подвергалась воздействию ультразвука в течение 1 минуты. С выключенным ультразвуковым диспергатором, дождавшись стабилизации графика гранулометрического распределения, фиксировались результаты измерения. Результаты гравиметрических определений объединялись с данными, полученными на лазерном анализаторе частиц, исходя из допущений о единстве плотностей и форм частиц во всем размерном диапазоне. Расчет площади поверхности осадка для оценки его сорбционной емкости был выполнен исходя из тех же допущений.

Определение органического углерода ($C_{\text{орг}}$) и карбонатного углерода ($C_{\text{карб}}$) выполнялось на анализаторе TOC-Vcph фирмы "Shimadzu" с приставкой SSM-5000A. Сущность метода, положенного в основу прибора, заключается в каталитическом окислении содержащихся в пробе соединений углерода при температуре до 1000°C в присутствии кислорода или кислородсодержащего газа до CO_2 и последующем его определении с использованием инфракрасного детектора. Площадь регистрируемого пика пропорциональна содержанию углерода в пробе. Для донных осадков диапазон измеряемых значений составляет 2–10000 мкг С. Воспроизводимость результатов анализов 5%. Перед началом серии анализов проводилась калибровка прибора по стандартным образцам [2].

В основе методов экстракции липидной фракции из образцов донных осадков лежат принципы наиболее полного извлечения исследуемых компонентов из матрицы объектов и исключение возможности трансформации органического вещества и его потерь в процессе пробоподготовки. Экстракция общей липидной фракции органического вещества проводилась из мокрых быстрозамороженных образцов донных осадков в ультразвуковой бане последовательно с помощью растворителей: первая экстракция — метанолом, вторая и третья экстракции — смесью хлористый метилен-метанол (2 : 1). Объединенные экстракты отмывались от нелипидных примесей подкисленной до pH 2 дистиллированной водой [5]. После упаривания экстракта на роторном испарителе липидная фракция делилась на неполярную и полярные фракции липидов методом колонной хроматографии на силикагеле. В качестве элюента для выделения неполярной фракции

использовался гексан. Полярные фракции последовательно элюировались смесью хлористый метилен—метанол, ацетоном, метанолом [11] и анализировались отдельно.

В неполярной фракции определялось содержание нормальных алифатических углеводородов (*n*-алканов) методом газо-жидкостной хроматографии. Анализ проводился на хроматографе Shimadzu GC-2010 с пламенно-ионизационным детектором. Условия анализа: колонка Restek Rxi-5Sil MS длиной 30 м, диаметром 0.25 мм, и толщиной нанесенной фазы 0.25 мкм, нагрев от 60 до 320°C со скоростью 4°C/мин, газ-носитель — гелий, расход 1.5 мл/мин, режим деления потоков 1/80. Для калибровки прибора и определения времени выхода идентифицируемых веществ использовалась смесь калибровочных стандартов углеводородов nC_{10} — nC_{40} (Fluka 04070, 04071). Для расчета концентраций использовался внутренний стандарт — сквалан (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракозан). Чувствительность метода составляла 1 нг индивидуального компонента в вводимой пробе, объем вводимой пробы 2 мкл. Воспроизводимость 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гранулометрический состав. Для всех станций разреза характерно преобладание песчаной и алевритовой фракций в составе осадков (табл. 1) над пелитовой, доля которой не превышает 15%. Для большинства исследованных проб характерно бимодальное распределение частиц (рис. 2б) с максимумами на 8 и 100 мкм (рис. 3а). Гранулометрический состав осадков поверхностного и подстилающего горизонтов практически полностью идентичен, но при этом прослеживается тенденция незначительного увеличения доли песка в поверхностном горизонте относительно подстилающего. На двух глубоководных станциях разреза (ст. 7494, 7498) доля алеврита превышает долю песка, по мере приближения к берегу песок начинает преобладать (рис. 3г). Существенные отличия гранулометрического состава зафиксированы в осадках ст. 7501 (рис. 3в). Песчаная фракция в них практически отсутствует, распределение мономодально, преобладает алеврит (>80%).

Все исследованные осадки, за исключением осадков ст. 7501, сформированы плохо сортированным материалом (коэффициент сортировки 4–5). Коэффициент сортировки возрастает по мере уменьшения глубины пробоотбора, за счет увеличения доли песчаной фракции. При этом при исключении песчаной фракции из расчетов коэффициентов сортировки они остаются практически неизменными для всех изученных

образцов (коэффициент сортировки ~3). Модальный диаметр алевропелитовой фракции также одинаков для всех образцов (7.5 мкм), что показывает единый источник поставки алевропелита в осадки. Исключение — ст. 7498 (рис. 3б). Модальный диаметр алевропелита в ней 15 мкм, а распределение частиц по размерам существенно отличается от распределения на остальных станциях.

Содержание органического углерода. Содержание органического углерода в донных осадках разреза варьирует от 0.46% в поверхностном горизонте шельфовой ст. 7502 до 2% в поверхностном горизонте глубоководной ст. 7494 (табл. 1, рис. 2в). Среднее содержание $C_{орг}$ во всех исследованных пробах составляет около 1%, что совпадает со средними величинами для моря [14]. Для глубоководных станций разреза (ст. 7494, 7498, 7501) характерно увеличение содержания $C_{орг}$ в поверхностном горизонте относительно подповерхностного. Данный факт наиболее ярко выражен для самой глубоководной станции (ст. 7494), где в поверхностном горизонте содержание $C_{орг}$ на 40% больше, чем в подповерхностном (0–0.5 см 2%, 2–3 см 1.41%). Для песчаных осадков шельфовой зоны содержание углерода в исследованных горизонтах практически идентично. Исключение составляет ст. 7502, где содержание углерода на поверхности меньше, чем в подстилающем горизонте.

Ранее было показано, что для шельфовых осадков арктических морей существует тесная связь между гранулометрическим составом и содержанием в них $C_{орг}$ [1, 13]. Данная зависимость также прослежена для исследованных проб разреза (рис. 4). В отличие от предыдущих работ, где для исследования зависимостей использовалось суммарное содержание пелитовой и алевритовой фракции, нами был выполнен расчет суммарной площади поверхности частиц. На взгляд авторов, использование для расчета площадей поверхности более точно позволяет разделить углерод, сорбируемый на поверхности частиц от включений детрита.

По всем исследованным пробам выявлена достоверная линейная зависимость ($R^2 = 0.71$) содержания $C_{орг}$ в осадках от суммарной площади поверхности частиц. При этом фиксируются две точки с повышенным относительно тренда содержанием углерода. Это поверхностные горизонты станций 7494 и 7505. Относительное повышение концентраций органического углерода позволяет предположить наличие дополнительного источника поставки ОВ в осадки на данных горизонтах. При исключении данных точек из расчета линии тренда коэффициент корреляции существенно возрастает ($R^2 = 0.86$).

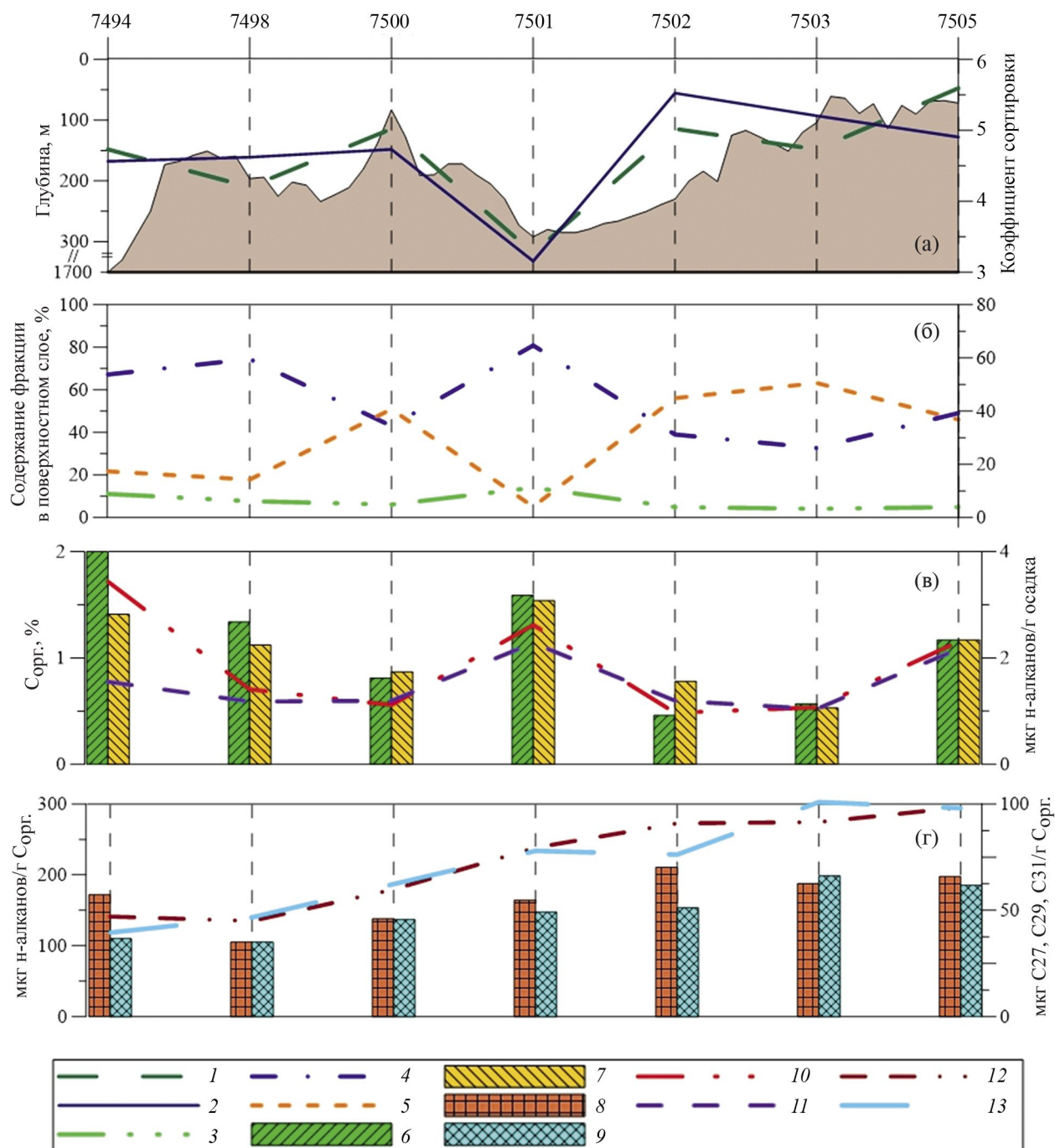


Рис. 2. Профиль глубин северо-восточной части Карского моря с указанием станций пробоотбора (а); гранулометрический состав поверхностных ДО (0–1 см) (б); $C_{орг}$, % и сумма n -алканов, мкг/г осадка (в); сумма n -алканов, мкг/г $C_{орг}$ и сумма высокомолекулярных n -алканов (C_{27} , C_{29} , C_{31}), мкг/г $C_{орг}$ (г).
 1 – коэффициент сортировки в поверхностном слое ДО (0–1 см); 2 – коэффициент сортировки в подповерхностном слое ДО (2–3 см); 3 – содержание пелитовой фракции в поверхностном слое ДО; 4 – содержание алевритовой фракции в поверхностном слое ДО; 5 – содержание песчаной фракции в поверхностном слое ДО; 6 – $C_{орг}$ в поверхностном слое ДО (0–1 см); 7 – $C_{орг}$ в подповерхностном слое ДО (2–3 см); 8 – сумма n -алканов (мкг/г $C_{орг}$) в поверхностном слое ДО; 9 – сумма n -алканов (мкг/г $C_{орг}$) в подповерхностном слое ДО (2–3 см); 10 – сумма n -алканов (мкг/г осадка) в поверхностном слое ДО (0–1 см); 11 – сумма n -алканов (мкг/г осадка) в подповерхностном слое ДО (2–3 см); 12 – сумма высокомолекулярных n -алканов (C_{27} , C_{29} , C_{31}) (мкг/г $C_{орг}$) в поверхностном слое ДО; 13 – сумма высокомолекулярных n -алканов (C_{27} , C_{29} , C_{31}) (мкг/г $C_{орг}$) в подповерхностном слое ДО (2–3 см).

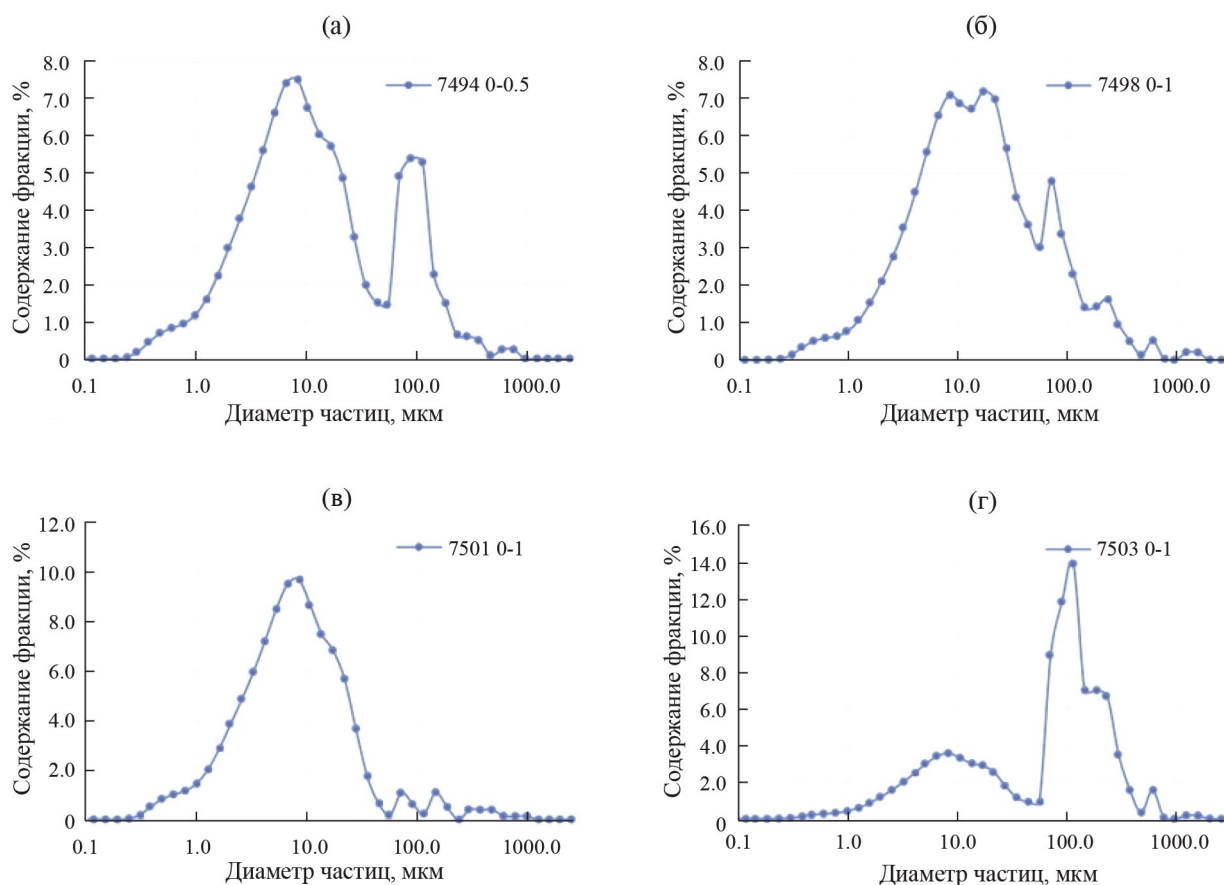


Рис. 3. Гранулометрическая характеристика осадков поверхностного горизонта в северо-восточной части Карского моря.

Карбонаты в осадках обнаружены только на ст. 7494 и 7498 в северной части разреза (табл. 1). Концентрация их незначительна. На всех остальных станциях карбонатный углерод не обнаружен.

Содержание и состав нормальных алифатических углеводородов. Содержание *n*-алканов в осадке варьирует от 1 до 3.4 мкг/г осадка (табл. 2, рис. 2в) при среднем по всем исследованным образцам 1.7 мкг/г. Максимум их содержания отмечен в поверхностном горизонте ст. 7494 (3.4 мкг/г), повышенные содержания — на ст. 7501 и 7505 (табл. 2). Доля *n*-алканов в составе ОВ меняется от 105 до 211 мкг/г $C_{орг}$ при среднем содержании 158 мкг/г $C_{орг}$. Содержание *n*-алканов в осадках прямо пропорционально содержанию органического вещества ($R^2 = 0.75$), при этом отношение *n*-алканы/ $C_{орг}$ различно для мористых (ст. 7494, 7498) и прибрежных станций разреза (табл. 2). При исключении двух мористых станций коэффициент корреляции между содержанием *n*-алканов и $C_{орг}$ возрастает до 0.89.

В спектре распределения *n*-алканов доминируют нечетные высокомолекулярные гомологи

(C_{23} – C_{33}). Их количество в составе алканов меняется от 45 до 76% отн. со средним значением 69% (табл. 2). Из них основная доля приходится на гомологи C_{27} – C_{31} (27–53% отн.) с явным преобладанием гомолога C_{31} (10–20%).

Содержание терригенных (C_{27} , C_{29} , C_{31}) алканов варьирует от 0.4 до 1.3 мкг/г осадка (табл. 2, рис. 2г) при среднем значении 0.75 мкг/г. При этом для большинства исследованных проб характерное содержание терригенных алканов составляет 0.4–0.6 мкг/г, повышенные значения фиксируются на ст. 7501 и 7505 (1.1–1.3 мкг/г). Доля терригенных алканов в составе ОВ растет по мере приближения к берегу от 40 до 100 мкг/г $C_{орг}$ (табл. 2, рис. 2).

Доля низкомолекулярных гомологов (C_{12} – C_{22}), которые маркируют ОВ автохтонного происхождения, в среднем не превышает 17%. Их относительно высокие содержания отмечены только на ст. 7494, где в поверхностном горизонте их доля составляет 35%. Необходимо отметить, что на всех хроматограммах выявлено присутствие неидентифицированных соединений в низкомолекулярной области, доля которых значительно превышает долю нормальных углеводородов (рис. 5).

Высокие значения индекса CPI (среднее 5.4) показывают низкую степень преобразованности терригенного ОВ. При этом для прибрежной части разреза характерны более высокие значения индекса CPI, чем для мористой (табл. 2), что маркирует увеличение степени трансформации ОВ по мере удаления от суши. Наиболее низкое значение CPI (2.7) зафиксировано в поверхностном горизонте ст. 7494, где процессы преобразования ОВ проходят наиболее активно. Об увеличении степени трансформации ОВ по мере удаления от берега также свидетельствует отношение $(C_{23} + C_{25})/(C_{29} + C_{31})$. Для прибрежных станций данное отношение ниже, чем для мористых, что

так же показывает идущий процесс трансформации ОВ.

В низкомолекулярной области спектра отсутствует ярко выраженное преобладание как четных, так и нечетных гомологов (OEP_{C17}). Это говорит о значительной степени преобразованности той малой доли автохтонного ОВ, которое аккумулируется в донных осадках.

Отношение пристан/фитан ($Pr/Ph > 1$) показывает, что формирование автохтонного ОВ происходило преимущественно в окислительных условиях, однако общее содержание низкомолекулярных гомологов в исследованных образцах незначительно, что не позволяет говорить об этом с уверенностью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для исследованного разреза характерно преобладание алеврита в составе осадков. Такой гранулометрический состав является типичным для бассейна Карского моря. Повышенное содержание пелитовой фракции выявлено только в устьевых и эстуарных зонах [7, 17], а преобладание песка характерно для перемываемых прибрежными течениями осадков зоны глубин до 30 м юго-западной части моря [6]. При этом содержание песчаной фракции в исследованных алевритовых осадках больше, чем в алевритах центральной части моря [12, 17]. Для осадков Баренцева моря в целом характерно преобладание более тонкого материала, гранулометрический состав осадков

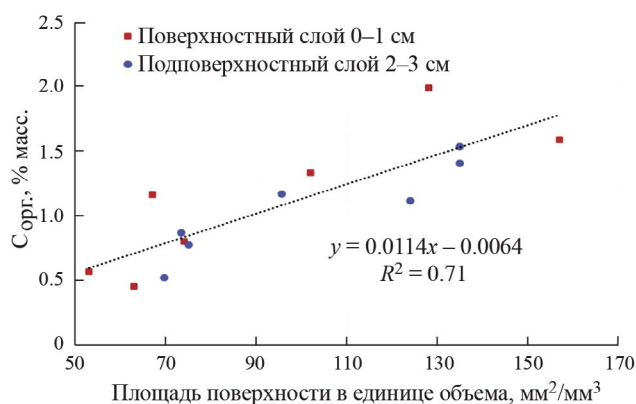


Рис. 4. Взаимосвязь содержания органического углерода с гранулометрическим составом донных осадков северо-восточной части Карского моря.

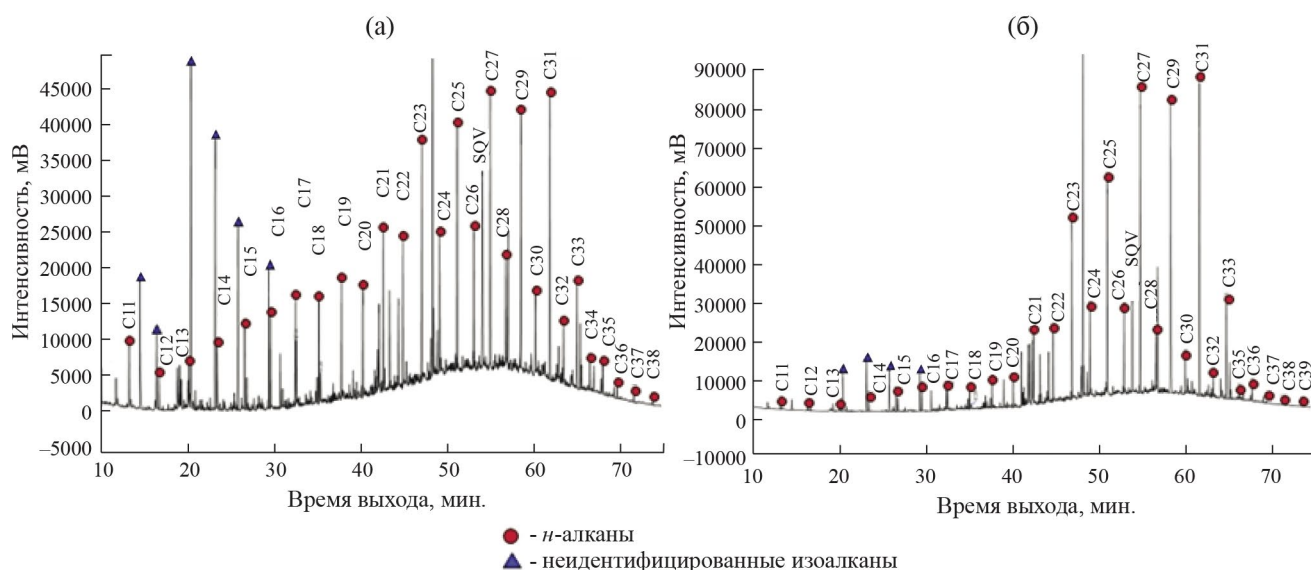


Рис. 5. Типичные хроматограммы неполярных фракций углеводородов (а — ст. 7494, б — ст. 7503).

Таблица 1. Гранулометрический состав и содержание органического ($C_{орг}$) и карбонатного ($C_{карб}$) углерода в донных осадках северо-восточной части Карского моря

№ станции	Горизонт, см	Глубина дна, м	Координаты		Гранулометрический состав, %			Коэффициент сортировки σ_G^*	$C_{орг}$, % масс.	$C_{карб}$, % масс.
			с.ш.	в.д.	пелит (<2 мкм)	алеврит (2–63 мкм)	песок (>63 мкм)			
7494	0–0.5	1652	82.228	78.486	11.1	67.2	21.7	4.7	2.00	0.064
	2–3				12.1	67.4	20.5	4.6	1.41	0.011
7498	0–1	196	80.899	81.654	7.7	74.5	17.8	4.2	1.34	0.016
	2–3				10.7	71.2	18.1	4.6	1.12	н.о.
7500	0–1	83	79.732	83.038	6.1	43.0	50.9	5.0	0.81	н.о.
	2–3				5.9	46.0	48.1	4.7	0.87	н.о.
7501	0–1	292	79.266	87.635	14.0	80.9	5.1	3.3	1.59	н.о.
	2–3				11.2	83.2	5.6	3.2	1.54	н.о.
7502	0–1	230	78.599	88.072	4.9	39.0	56.1	5.0	0.46	н.о.
	2–3				6.5	40.1	53.4	5.5	0.78	н.о.
7503	0–1	104	78.015	88.623	4.1	32.7	63.2	4.7	0.57	н.о.
	2–3				5.7	40.0	54.3	5.2	0.53	н.о.
7505	0–1	72	76.969	87.676	4.9	49.1	46.0	5.6	1.17	н.о.
	2–3				8.9	46.2	44.9	4.9	1.17	н.о.

* $\sigma_G = \exp((\ln(P_{84}) - \ln(P_{16})) / 4 + (\ln(P_{95}) - \ln(P_5)) / 6.6)$, где P — размер частиц в мкм, обозначающий границу, которая отсекает 5, 16, 84 и 95% всех частиц в образце меньших или равных по размеру.

Таблица 2. Основные органо-геохимические индексы образцов донных осадков северо-восточной части Карского моря

Станция	7494		7498		7500		7501		7502		7503		7505	
Горизонт	0-0.5	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3	0-1	2-3
$C_{орг}$, % масс.	2.00	1.41	1.34	1.12	0.81	0.87	1.59	1.54	0.46	0.78	0.57	0.52	1.17	1.17
CPI*	2.7	4.6	5.2	5.0	5.1	5.4	5.3	5.8	5.7	6.6	5.8	6.2	5.7	6.3
OEP _{C17}	1.3	1.4	1.4	1.5	2.0	2.0	1.9	1.5	1.9	2.2	1.5	1.4	1.8	2.0
OEP _{C19}	1.4	1.5	1.6	1.7	2.2	2.2	1.6	1.7	1.9	2.0	1.7	1.7	1.9	2.0
$i-C_{19}/i-C_{20}$	2.1	0.5	1.0	0.7	2.0	1.9	2.1	1.3	4.0	4.1	2.9	1.3	3.4	3.3
$i-C_{19}/C_{17}$	0.8	0.2	1.8	1.4	1.1	1.0	1.1	0.8	1.4	1.0	1.2	0.5	1.0	0.8
$i-C_{20}/C_{18}$	0.4	0.4	2.3	2.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3	0.3
n-алканы, мкг/г	3.4	1.6	1.4	1.2	1.1	1.2	2.6	2.3	1.0	1.2	1.1	1.0	2.3	2.2
n-алканы/ $C_{орг}$, мкг/г	172	110	105	105	138	137	164	148	211	153	188	198	198	185
$C_{27+29+31}$, мкг/г	0.9	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	1.3	1.2	0.4	0.6	0.5	0.5	1.1	1.1
$C_{27+29+31}/C_{орг}$, мкг/г	47	40	45	47	60	62	79	78	91	76	91	101	98	98

* $CPI = 0.5 \times [(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})]$.

моря Лаптевых сходен с осадками Карского [17, 18, 19]. Бимодальное размерное распределение в большинстве проб донных осадков позволяет предположить наличие нескольких источников поставки материала в донные осадки, а присутствие отдельного пика песчаной фракции во всех

пробах может указывать на вклад ледового разноразмерия в формирование осадочного чехла.

Среднее содержание органического углерода в осадках северо-восточной части Карского моря также сходно со средним для всего бассейна моря. Наличие линейной зависимости содержания

$C_{\text{орг}}$ от площади поверхности частиц позволяет предположить, что преимущественным способом накопления углерода в осадках является его сорбция на поверхности частиц. Данный факт ранее отмечался для моря Лаптевых [18]. При этом в поверхностных горизонтах двух мористых станций было отмечено существенное повышение содержания $C_{\text{орг}}$ относительно сорбирующей поверхности, что указывает на присутствие дополнительного источника поставки ОВ в осадки. Также практически для всех исследованных станций содержание $C_{\text{орг}}$ в поверхностном горизонте выше, чем в подстилающем. Увеличение содержания органического углерода в поверхностных слоях осадков Карского моря фиксировалось ранее [2, 4] и может объясняться дополнительными поставками органического вещества в процессе седиментации [3, 8]. Уменьшение нетипично и, возможно, связано с активными гидродинамическими процессами.

Поставку новообразованного автохтонного ОВ в поверхностный горизонт наиболее глубоководной станции разреза 7494 также хорошо маркирует заметное увеличение в нем содержания *n*-алканов как в абсолютных, так и в относительных значениях. При этом возрастание концентраций углеводородов в данном горизонте обусловлено повышенными концентрациями алканов низкомолекулярной области спектра (C_{12} – C_{22}) (56 мкг/г $C_{\text{орг}}$, рис. 5А), связанных с продукцией гидробионтов. Доля низкомолекулярных гомологов в спектре алканов составляет 35%, тогда как среднее по всем исследованным пробам не превышает 17% (рис. 5Б). Относительное увеличение содержания *n*-алканов автохтонного генезиса также отмечено в поверхностном слое осадков ст. 7502. Однако на данной станции увеличение концентрации *n*-алканов низкомолекулярной области (до 33 мкг/г $C_{\text{орг}}$) связано не с увеличенными поставками автохтонного ОВ в осадки, а с заметным снижением концентраций $C_{\text{орг}}$ в данном горизонте.

Доля алканов терригенного генезиса в составе ОВ (C_{27} , C_{29} , C_{31}) снижается с увеличением расстояния от берега. При этом также снижается индекс СРІ, показывающий степень преобразованности ОВ, маркируя процессы преобразования органического вещества (табл. 2). Прямая корреляция содержания терригенных алканов с $C_{\text{орг}}$ в морях Российской Арктики характерна для устьевых зон, на открытом шельфе она прослеживается сильно хуже [15, 18]. Отсутствие данной зависимости для исследуемого района показывает многообразие источников поставки ОВ в осадки с пониженной по сравнению с центральной частью моря ролью ОВ речного стока. При этом прослеживаемые корреляционные зависимости суммарного содержания *n*-алканов от $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{грану}}$

лометрического состава показывают устойчивую связь захоранивающегося ОВ с минеральной матрицей.

Необходимо отметить зависимость изменения индекса СРІ от горизонта отбора. Типично, в процессе биогеохимических преобразований ОВ разница в концентрациях нечетных и четных алканов уменьшается, соответственно уменьшается и значение индекса СРІ. При условии, что взвешенное вещество является единственным источником органического вещества в осадках, индекс СРІ в алканах взвеси должен быть выше, чем в верхнем слое донных осадков. В свою очередь, в верхнем слое осадков должны фиксироваться более высокие значения индекса, чем в подстилающих горизонтах. В исследованном районе ситуация обратная. Индекс СРІ в пробах поверхностного горизонта значимо ниже, чем в подстилающих осадках для большинства исследованных станций. Это позволяет говорить о том, что высокомолекулярные *n*-алканы терригенного генезиса подстилающего горизонта (2–3 см) менее преобразованы, чем поверхностного (0–1 см), что в целом нетипично для донных отложений. При этом индекс СРІ исследованных образцов алканов взвеси существенно ниже и составляет менее 2 [3]. Это показывает, что терригенная составляющая алканов взвеси гораздо более глубоко преобразована, чем та же составляющая алканов осадков. На основании данных фактов можно сделать предположение, что *n*-алканы взвеси осеннего периода оказывают только незначительное влияние на формирование ОВ поверхностного слоя донных осадков и не фиксируются в подстилающих горизонтах. Однако органическое вещество взвеси может обогащать ОВ донных осадков алканами терригенного генезиса, образующимися в результате процессов деструкции липидной фракции ОВ взвеси.

Содержание терригенных *n*-алканов (C_{27} , C_{29} , C_{31}) в исследованных образцах осадков существенно ниже, чем в образцах из зоны выноса Оби и Енисея. По литературным данным [15] среднее содержание гомологов C_{27} , C_{29} , C_{31} в осадках зоны выноса составляет 4.5 мкг/г (по 13 станциям) тогда как в исследованных образцах — в шесть раз меньше (0.75 мкг/г, по 7 станциям). Те же тенденции наблюдаются и для доли терригенных алканов в составе ОВ. Среднее значение для исследованных проб — 72 мкг/г $C_{\text{орг}}$ для зон речного выноса — 316 мкг/г $C_{\text{орг}}$. Также терригенные алканы зоны выноса значительно более трансформированы. Для них характерное значение СРІ — 3, для исследованных проб — более 5. Это показывает, что большинство терригенных алканов, поставляемых с речным стоком, осаждаются, не доходя до исследуемого района.

ВЫВОДЫ

Исследованный район находится под минимальным влиянием речного стока по сравнению с другими областями Карского моря. Исходя из этого факта, при начале работ авторы предполагали обнаружить отличия как гранулометрического состава осадков, так и содержания и состава органического вещества от других районов. Однако по завершении исследований существенных отличий выявлено не было. Гранулометрический состав осадков северо-восточной части моря сходен с составом осадков центральной части, среднее содержание органического углерода также совпадает со средним по морю. В гранулометрическом составе осадков обычно преобладает алеврит, при этом размерное распределение частиц бимодально и практически во всех образцах фиксируется примесь песка, которая увеличивается в осадках станций, расположенных ближе к берегу. Среднее содержание $C_{орг}$ составляет 1.1% (14 проб, 7 станций), при этом содержание $C_{орг}$ в поверхностных горизонтах (0–1 см) обычно выше, чем в подстилающих (2–3 см). Существенное увеличение концентрации $C_{орг}$ (2%) зафиксировано лишь на одном поверхностном горизонте самой глубоководной станции разреза (ст. 7494). Показано существование линейной зависимости между содержанием органического углерода и площадью поверхности частиц осадка, рассчитанной по данным лазерного дифракционного анализа. Устойчивая корреляция между этими двумя параметрами указывает, что сорбция на поверхности частиц может являться преимущественной формой аккумуляции ОВ в осадках. Ухудшение данной зависимости для отдельных поверхностных горизонтов связано с повышением концентраций $C_{орг}$, обусловленным поставками планктонного ОВ. Средняя концентрация n -алканов по всем исследованным пробам составила 1.1 мкг/г осадка. Показана тесная связь концентраций n -алканов с содержанием органического вещества в осадках ($R^2 = 0.75$). Установлено, что в спектре распределения нормальных углеводородов доминируют нечетные высокомолекулярные гомологи, которые маркируют ОВ терригенного происхождения. При этом доля терригенных алканов в спектре увеличивается на станциях разреза, приближенных к берегу. Выявлено увеличение индекса CPI в подстилающем слое осадков, показывающее уменьшение степени преобразованности ОВ. Характерные концентрации терригенных углеводородов для исследованного района существенно ниже, чем для зоны выноса Оби и Енисея.

Ранее в работе В.И. Петровой с соавт. [15] была показана четкая смена состава органического вещества континентального склона по сравнению с ОВ шельфовых осадков. На склоне в осадках

доминирует ОВ автохтонного происхождения, на шельфе аллохтонного. Планируя настоящую работу, авторы надеялись выявить данный переход для исследуемого района. Однако этого сделать не удалось. В составе органического вещества на всех исследованных станциях доминирует ОВ аллохтонного генезиса. Возможно, граница смены условий накопления ОВ в осадках расположена северней исследованного разреза.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2024-0019. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность академику РАН М.В. Флинту за всестороннюю поддержку их исследований и Е.А. Романкевичу за научное руководство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Н.А.* Органическое вещество и углеводородные маркеры Белого моря: Дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.28. М., 2015. 172 с.
2. *Беляев Н.А., Пересыпкин В.И., Поняев М.С.* Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков западной части Карского моря // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 748–757.
3. *Беляев Н.А., Поняев М.С.* Органическое вещество пограничных зон Карского моря // *Экосистема Карского моря — новые данные экспедиционных исследований: Материалы научной конференции*, Москва, 27–29 мая 2015 года / Под ред. Флинта М.В. Москва: ООО “АПР”, 2015. С. 227–231.
4. *Беляев Н.А., Поняев М.С., Кирютин А.М.* Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков центральной части Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 563–576.
5. *Беляева А.Н.* Экстракция липидов из морской и иловой воды, взвеси и донных осадков // *Методы исследования органического вещества в океане* / Под ред. Романкевича Е.А. М.: Наука. 1980. 344 с.
6. *Кошелева В.А., Яшин Д.С.* Донные осадки Арктических морей России / Под ред. Грамберга И.С. СПб.: ВНИИ Океангеология, 1999. 112 с.
7. *Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р.* Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
8. *Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С. и др.* Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 643–679.

9. *Осадчиев А.А.* Речные плюмы. М.: Научный мир, 2021. 288 с.
10. *Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н.* Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 297 с.
11. Couturier L.I.E., Michel L.N., Amaro T. et al. State of art and best practices for fatty acid analysis in aquatic sciences // *Journal of Marine Science* 2020. V. 77. № 7–8. P. 2375–2395. <http://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa121>
12. *Felden J., Möller L., Schindler U. et al* PANGAEA — Data Publisher for Earth & Environmental Science. // *Scientific Data*. 2023. V. 10. № 1. P. 347. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02269-x>
13. *Macdonald R.W., Naidu A.S., Yunker M.B. et al.* The Beaufort Sea: Distribution, Sources, Fluxes and Burial Rates of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) *The organic carbon cycle in the Arctic ocean*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 177–193.
14. *Martens J., Romankevich E., Semiletov I. et al.* CASCADE — The Circum-Arctic Sediment CARbon DatabasE. // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13. P. 2561–2572. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2561-2021>
15. *Petrova V.I., Batova G.I., Zinchenko A.G. et al.* The East Siberian Sea: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) *The organic carbon cycle in the Arctic ocean*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 204–212.
16. *Pivovarov S., Schlitzer R., Novikhin A.* River run-off influence on water mass formation in the Kara Sea // In: Stein R. et al (Eds.) *Siberian river run-off in the Kara Sea*. Elsevier Science, 2003. P. 9–25.
17. *Stein R., Fahl K.* The Kara Sea: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) *The organic carbon cycle in the Arctic ocean*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 237–266.
18. *Stein R., Fahl K.* The Laptev Sea: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) *The organic carbon cycle in the Arctic ocean* Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 213–237.
19. *Vetrov A.A., Romankevich E.A.* The Barents Sea: Distribution, Sources, Variability and Burial of Organic Carbon // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) *The organic carbon cycle in the Arctic ocean* Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 266–278.
20. *Wentworth C. K.* A scale of grade and class terms for clastic sediments // *The Journal of Geology*. 1922. V. 30. № 5. P. 377–392.

GRAIN SIZE DISTRIBUTION, ORGANIC CARBON AND GEOCHEMICAL MARKERS IN THE SURFACE LAYER OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE NORTHEASTERN PART OF THE KARA SEA

E. A. Streltsova[#], N. A. Belyaev, V. Y. Fedulov, and E. M. Pushkareva

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]*e-mail: Alena.st@mail.ru*

The upper layer of bottom sediments in the northeastern part of the Kara Sea is studied. It is shown that the composition of sediments is dominated by silt, the proportion of sand increases towards the shore. The content of organic carbon (average value — 1.1% wt.) is close to the average content in sediments of the Kara Sea, increasing at deep-sea stations. The revealed linear relationship between the content of organic carbon and the surface area of sediment shows that sorption on the particles surface is the predominant accumulation form of organic matter (OM) in sediments. The average n-alkanes concentration in the analysed samples is 1.1 µg/g of sediment, the distribution spectrum is dominated by terrigenous origin odd high-molecular homologues.

Keywords: grain size distribution, organic carbon, n-alkanes, biomarkers, bottom sediments, Kara Sea, Arctic