

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2024 г. Н. А. Шульга^{1, *}, Е. А. Стрельцова¹, Н. В. Вылегжанина²,
В. Ю. Федулов¹, А. В. Полякова², Е. А. Романкевич¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: nash.ocean@gmail.com

Дата поступления 25.02.21 г.

После доработки 21.06.2022 г.

Принята к публикации 18.07.23 г.

Исследованы источники поставки и трансформации органического вещества (ОВ) при переходе из растворенной формы во взвесь, наилкок и в донные осадки на меридиональном разрезе от дельты р. Лены до континентального склона (в интервале глубин от 10 до 2390 м, 63-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”, сентябрь 2015 г.). Результаты изучения молекулярных маркеров ОВ показали, что растворенное и взвешенное ОВ морского и терригенного генезиса биodeградирует в водной толще и практически не накапливается в донных осадках. ОВ вод речного стока Лены в летний период не способствует формированию ОВ донных осадков. На внешнем шельфе выявлена область влияния подледного цветения на процесс осадконакопления.

Ключевые слова: море Лаптевых, *n*-алканы, органическое вещество, донные отложения, геохимия, Арктика

DOI: 10.31857/S0030157424020045 **EDN:** RWETBM

ВВЕДЕНИЕ

Море Лаптевых является одним из хорошо изученных морей Российской Арктики. Внимание исследователей сфокусировано на вопросах поставки терригенного материала [18, 24, 28, 34, 36, 44, 45], потоках метана из воды в атмосферу [26, 40] и таянии наземной мерзлоты [39, 41, 46]. Отдельный интерес представляют исследования гидрологических фронтальных зон и ассоциированных с ними химических, геохимических и биологических процессов [6, 16, 17, 33, 43].

Бассейн моря находится под доминирующим влиянием стока р. Лены (583 км³/год, 70% пресноводного стока), который постоянно увеличивается в связи с климатическими изменениями [6, 19, 35, 40]. В течение года в море Лаптевых вместе с речным стоком поступает около 70 млн т растворенных и 20 млн т взвешенных веществ [33, 43]. В том числе поставка органического углерода (C_{org}) в растворенной и взвешенной формах суммарно составляет ~7 млн т [12]. Органическое вещество (ОВ) в своем составе содержит предельные углеводороды (*n*-алканы), которые являются информативным индикатором седиментационных и диагенетических процессов и позволяют оценить его генезис [27]. Наиболее подробная органо-геохимическая характеристика осадков исследуемо-

го района представлена в работах [3, 9–11, 34, 44, 45, 47]. При этом до настоящего времени остаются недостаточно исследованными: поведение ОВ в водной толще во взвешенной и растворенной формах и его связь со сменой гидрофизических условий и биологическими процессами.

Данная работа посвящена изучению геохимических маркеров (C_{org} , *n*-алканов) на разрезе от выноса р. Лены до континентального склона с целью определения источников поставки и степени преобразованности ОВ в системе вода — взвесь — наилкок — осадок. Для выявления особенностей седиментации в районе исследования был выполнен анализ гранулометрического состава поверхностных донных осадков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили пробы воды, взвеси, наилка и донных осадков, отобранные в 63-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” на субмеридиональном разрезе (сентябрь 2015 г.) в восточной части моря Лаптевых (рис. 1, табл. 1). Разрез (глубины 10 – 2390 м) протягивается от внешней области губы Буор-Хая до верхней части континентального склона к котловине Амудсена и хребту Гаккеля.

°С.Ш.

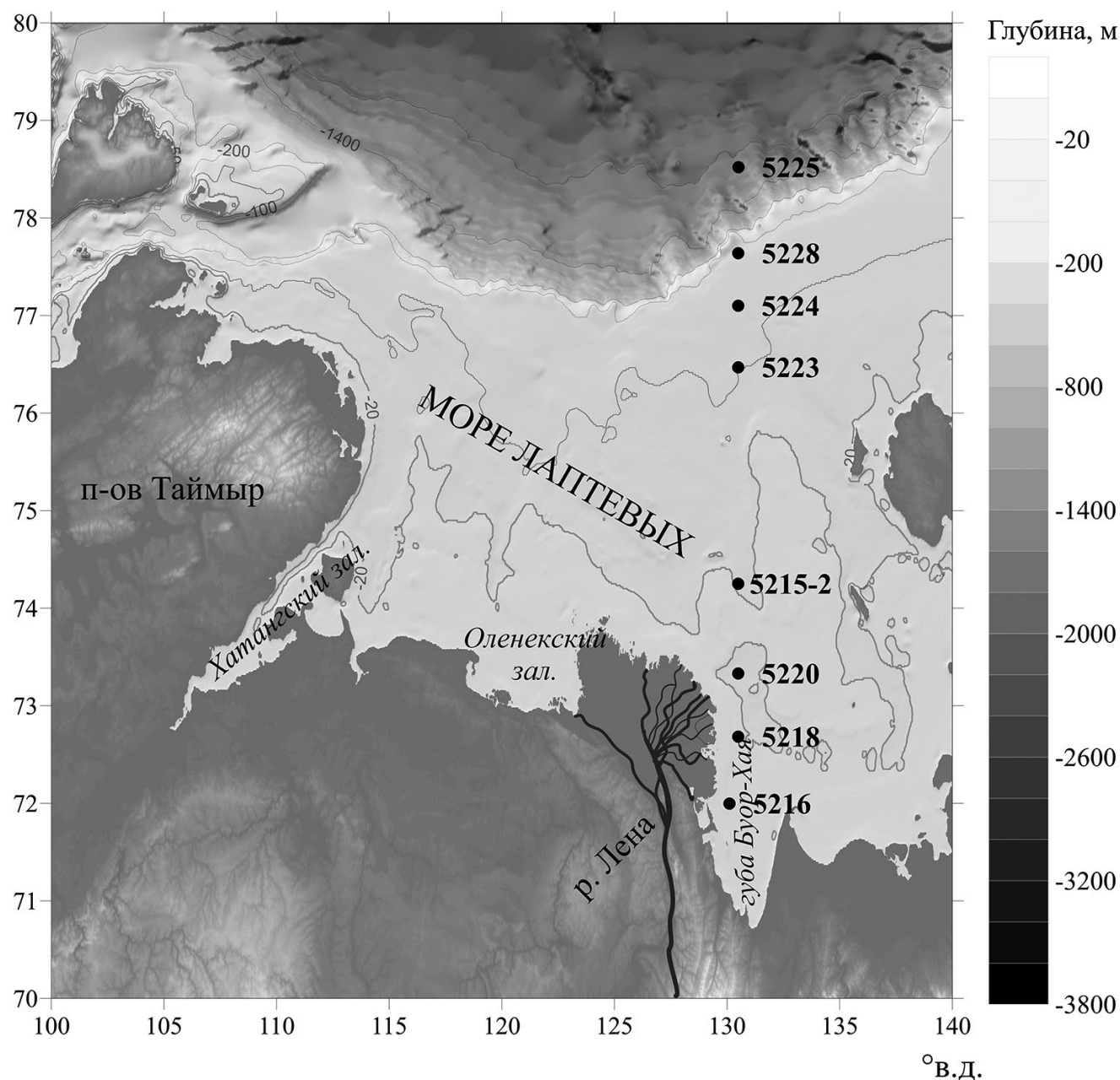


Рис. 1. Расположение станций пробоотбора в 63-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в море Лаптевых (сентябрь, 2015 г.).

Расположение станций определялось исходя из анализа смены гидрологических и гидрохимических условий при движении от дельты р. Лены к континентальному склону [4].

Воду отбирали батометрами Нискина. Для разделения растворенного (РОВ) и взвешенного органического вещества (ВОВ) воду фильтровали через стекловолоконные фильтры GF/F (размер пор 0.6–0.7 мкм) до насыщения фильтра. Фильтр

высушивали в сушильном шкафу при температуре 60°C до постоянного веса. Экстракцию алифатических углеводородов проводили из фильтрата хлористым метиленом в соотношении 3 : 1 (фильтрат : CH_2Cl_2). Предварительно фильтрат подкисляли соляной кислотой до pH~2. Экстракт хранили в стеклянных колбах при +4°C до проведения химического анализа. Отбор поверхностных проб донных осадков, в том числе наилка (0–0.5 см),

Таблица 1. Характеристики района исследований в сентябре 2015 г. (на основе данных [4, 15])

Область	Станция	Координаты		Глубина, м	Соленость	T, °C	Chl-a, мг/м ²	ПП, мгС/м ³ /день
		с.ш.	в.д.					
Дельта р. Лены	5216	71°59.8′	130°06.3′	10	2.72	8.36	6.61	26.0
	5218	72°41.0′	130°30.0′	18	5.75	8.34	4.98	24.7
	5220	73°20.0′	130°29.5′	25	17.7	5.07	8.95	15.9
	5215-2	74°15.0′	130°29.9′	26	21.1	3.52	6.42	10.8
Шельф	5223	76°28.2′	130°30.0′	58	20.6	3.68	3.86	15.3
	5224	77°06.1′	130°29.3′	59	22.0	3.57	1.77	7.49
	5228	77°38.3′	130°29.9′	91	27.0	2.96	7.73	7.29
Континенталь- ный склон	5225	78°22.0′	130°30.0′	2390	30.2	2.00	9.54	6.06

Примечание. Значения солености, температуры, хлорофилла “а” (Chl-a) и первичной продукции (ПП) приведены для поверхностного слоя воды.

осуществлялся трубкой Ниемисто. После пробоотбора образцы хранились при –18°С до камеральных исследований.

Определение растворенного (РОУ) и взвешенного (ВОУ) органического углерода, содержания органического углерода в осадках ($C_{орг}$) и карбонатного углерода ($C_{карб}$) выполняли на анализаторе TOC-Vcph фирмы Shimadzu с приставкой SSM-5000A. Для РОУ диапазон измеряемых концентраций составляет 0.1–250 мгС/л (объем вводимой пробы 50 мкл), для ВОУ 5–10000 мкгС/л. Для донных осадков диапазон измеряемых концентраций углерода 0.05–30% (на сухой вес осадка), навеска 100 мкг. Погрешность прибора 1%. Воспроизводимость результатов анализов 5%. Перед началом серии анализов проводилась калибровка прибора по стандартным образцам донных осадков (СДО2, СДО1, СДО3).

Экстракция общей липидной фракции ОВ (TLE) из образцов взвеси, наилка и донных осадков проводилась смесью хлористый метилен–метанол (9 : 1) с помощью ультразвука. Навеска лиофилизированных образцов осадков составляла ~10 г, наилка ~3 г, взвеси ~ ½ фильтра. Массу общей липидной фракции определяли гравиметрически после упаривания экстракта в токе азота. Предварительно экстракт очищали от серы с помощью активированной меди. Неполярную фракцию углеводородов выделяли методом колоночной хроматографии на силикагеле, в качестве элюента использовали гексан. Газохроматографический-масс-спектрометрический (ГХ-МС) анализ *n*-алканов и изопреноидов (пристан, фитан) выполняли на приборе Shimadzu QP-5050A (Япония). Условия ГХ разделения: кварцевая колонка с привитой жидкой фазой SE-30, температура инжектора 300°С, температура источника ионов 300°С. Режим программирования температуры: начальная температура колонки 60°С с выдерж-

кой 3 мин, нагрев до 300°С со скоростью 4°С/мин. Объем вводимой пробы — 2 мкл. Режим ввода пробы splitless. В качестве газа-носителя использовался гелий. Расход газа через колонку 1.2 мл/мин. Анализ проводился в режиме электронной ионизации (EI 70eV), сканирование масс-спектра от 40 до 800 ае. Идентификацию веществ проводили по временам удерживания и масс-спектрам исследуемых соединений стандартных образцов (*n*-C₈–C₄₀, Pr, Ph), а также библиотеке NIST. Для расчета концентраций использовался внутренний стандарт — SQV сквалан (2,6,10,15,19,23-гексаметилтетракозан). Содержание *n*-алканов в воде и взвеси приводится из расчета на объем профильтрованной воды (мкг/л). Содержание *n*-алканов в осадках и наилке приводится из расчета на сухую навеску образца (мкг/г осадка). Для нивелирования влияния гранулометрического состава осадков расчет проводился также и на массу углерода (мкгС/г).

Исследование гранулометрического состава проводили на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SHIMADZU SALD 2300. Подготовка валовых проб для гранулометрического анализа (навеска 1–2 г) включала выдерживание пробы в течение суток в дистиллированной воде (20 мл) с добавлением 20 мл раствора гексаметафосфата натрия (0.7% Na₆P₆O₁₈). Непосредственно перед анализом стакан с пробой помещали в ультразвуковую ванну на 5 минут для диспергирования частиц. В анализаторе проба подвергалась воздействию ультразвука в течение 1 минуты. Средний размер частиц осадка рассчитывался по методике [31].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Растворенное органическое вещество. Содержание РОУ в поверхностном слое воды на разрезе уменьшается от 5.96 до 2.32 мг/л с увеличением

солености при движении от дельты Лены к континентальному склону (табл. 1, 2). Концентрации растворенных липидов также уменьшаются с 3.43 до 2.58 мг/л, тогда как суммарные концентрации *n*-алканов возрастают к мористой части разреза с 0.003 до 0.008 мг/л (табл. 2).

Анализ липидной фракции ОВ показал наличие *n*-алканов в интервале C_{12} – C_{35} с мономодальным распределением. В составе *n*-алканов доминируют низкомолекулярные гомологи морского генезиса (рис. 2а, б, в, табл. 2). Их концентрации увеличиваются от дельты ($\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 1.51$) к континентальному склону ($\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 5.17$). В мористой части разреза в составе алканов происходит смена доминирующего гомолога с *n*- C_{18} на *n*- C_{16} . Содержания *n*-алканов терригенного генезиса $C_{27+29+31}$ на разрезе близки и составляют 0.41 мкг/л в среднем. При этом их доля в общем составе *n*-алканов последовательно убывает от дельты к склону и принимает значения 12, 8 и 5% соответственно.

Органическое вещество взвеси. Содержание ВОУ в поверхностном слое вод снижается от 509 мкг/л в заливе Буор-Хая до 73 мкг/л в мористой части разреза (табл. 2, рис. 3б). В глубинных слоях вод континентального склона на ст. 5225 содержание ВОУ значительно падает (12–28 мкг/л), при этом отмечен локальный максимум концентраций на горизонте 140 м (115 мкг/л). Концентрация липидов взвеси уменьшается по направлению от дельты (3.00 мг/л) к континентальному склону (0.27 мг/л). В толще воды (ст. 5225) содержание липидов изменяется незначительно (от 0.27 до 0.51 мг/л) на глубинах 0–600 м, падая практически до нуля в придонных горизонтах (табл. 2).

Содержание *n*-алканов во взвеси в поверхностном слое воды в заливе Буор-Хая и на шельфе было сходным (0.20 мкг/л). На северной оконечности разреза (ст. 5225) концентрация *n*-алканов в составе ВОВ резко снижается до 0.055 мкг/л (табл. 2). В образцах взвеси установлено наличие *n*-алканов C_{12} – C_{35} , их распределение различается в зависимости от удалённости от берега станции отбора (рис. 2г, д, е). В дельте (ст. 5218) максимумы концентраций *n*-алканов приходятся на средне- и высокомолекулярную области (рис. 2г). Здесь выявлено максимальное на всем разрезе содержание соединений терригенного генезиса ($C_{27+29+31} = 39.8$ нг/л). В мористой части разреза (ст. 5215-2) и на континентальном склоне (ст. 5225) максимумы концентраций *n*-алканов приходятся на низко- и среднемолекулярную области: $\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 4.00$ и 3.01 соответственно (табл. 2, рис. 2д, е). При этом на ст. 5215-2 выявлено максимальное для изученного разреза со-

держание гидробионтных соединений ($C_{15+17+19} = 32.1$ нг/л). На основании рассчитанных индексов нечетности во взвеси обнаружено доминирование четных гомологов в низкомолекулярной области ($OEP_{17-19} = 0.62$, в среднем). Для высокомолекулярных *n*-алканов индекс нечетности СРІ близок к 1 ($CPI = 1.37$, в среднем).

В толще воды на континентальном склоне (ст. 5225) с глубиной происходит постепенная смена основного источника поставки ВОВ с автотонного на аллохтонный, значение индекса $C_{15+17+19}/C_{27+29+31}$ снижается от 1.54 до 0.91 (табл. 2).

Органическое вещество донных отложений. На изученном разрезе процентное содержание $C_{орг}$ в поверхностном слое осадков колеблется от 0.38% (мелкозернистые пески) до 4.40% (алеврит). Наиболее высокие концентрации $C_{орг}$ характерны для осадков зоны стока вод р. Лены (табл. 3, рис. 3б, 4а).

Концентрации липидов в донных осадках снижаются при движении от дельты (475 мкг/г) в сторону континентального склона (88.8 мкг/г), достигая максимальных значений в наилке в зоне выноса р. Лены (616 мкг/г, табл. 3). Концентрации *n*-алканов, рассчитанные на сухую массу и на углерод, так же убывают по направлению к склону от дельты. Хроматографический анализ экстрактов показал наличие *n*-алканов в диапазоне C_{12} – C_{35} с различным групповым соотношением гомологов (рис. 2ж, з, и). Распределение *n*-алканов носит мономодальный характер (кроме ст. 5224), явно выражены пики C_{27} , C_{29} , C_{31} , C_{33} . На основании рассчитанных индексов нечетности OEP_{17-19} и СРІ обнаружено доминирование четных гомологов в низкомолекулярной области и нечетных в высокомолекулярной (0.60 и 6.21 в среднем соответственно). Исключение составляет ст. 5225, где в распределении *n*-алканов в низкомолекулярной области доминируют нечетные гомологи и $OEP_{17-19} = 1.24$.

Гранулометрический состав поверхностных осадков и наилка, представленный в таблице 4, значительно меняется по разрезу (рис. 3в, 4б).

В составе осадков ст. 5218 и ст. 5220 преобладает плохо сортированный алеврит (коэффициент сортировки 3.7–4.0) с примесью пелита и песка (рис. 3в, 4а). Распределения размеров частиц демонстрируют бимодальный характер (моды 8.55 и 20.3 мкм; 8.55 и 230 мкм, соответственно) при среднем размере частиц 10.6 и 9.08 мкм (рис. 3д). На ст. 5215-2 осадки представлены хорошо сортированным песком (коэф. сортировки 1.28, мономодальное распределение) со средним размером частиц 155 мкм. При движении на север пески сменяются

Таблица 2. Содержание растворенного и взвешенного ОВ в пробах воды и взвеси, отобранных на меридиональном разрезе моря Лаптевых в сентябре 2015 г. Органо-геохимические индексы ОВ рассчитаны на основе содержания *n*-алканов.

Растворенное органическое вещество														
№ стан- ции	Гори- зонт, м	РОУ, мгС/л	TLE*, мг/л	<i>n</i> -ал- каны, мкг/л	C ₁₅₊₁₇₊₁₉ , мкг/л	C ₂₇₊₂₉₊₃₁ , мкг/л	C ₁₅₊₁₇₊₁₉ , %	C ₂₇₊₂₉₊₃₁ , %	C ₁₆₊₁₈ +C ₂₀₋₂₄ , %	C ₁₅₊₁₇₊₁₉ / C ₂₇₊₂₉₊₃₁	ΣC ₁₂₋₂₄ / ΣC ₂₅₋₃₅	TAR	OEPC ₁₇₋₁₉	CPI
5216	0	5.96	3.43	2.58	0.24	0.31	9.2	12.1	53.0	0.76	1.51	1.32	0.24	1.22
5215-2	0	3.61	2.78	6.10	1.15	0.49	18.8	8.1	42.8	2.33	2.94	0.43	0.34	1.18
5225	0	2.32	2.58	7.86	1.07	0.43	13.6	5.5	68.9	2.45	5.17	0.41	0.19	0.90
Взвешенное органическое вещество														
№ стан- ции	Гори- зонт, м	ВОУ, мкгС/л	TLE, мг/л	<i>n</i> -ал- каны, мкг/л	C ₁₅₊₁₇₊₁₉ , нг/л	C ₂₇₊₂₉₊₃₁ , нг/л	C ₁₅₊₁₇₊₁₉ , %	C ₂₇₊₂₉₊₃₁ , %	C ₁₆₊₁₈ +C ₂₀₋₂₄ , %	C ₁₅₊₁₇₊₁₉ / C ₂₇₊₂₉₊₃₁	ΣC ₁₂₋₂₄ / ΣC ₂₅₋₃₅	TAR	OEPC ₁₇₋₁₉	CPI
5218	0	509	3.00	0.20	14.4	39.8	7.17	19.8	48.3	0.36	0.92	2.76	0.87	1.52
5220	0	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5215-2	0	254	0.77	0.20	32.1	17.5	16.2	8.85	55.6	1.83	4.00	0.41	0.52	0.67
	10	173	0.67	0.18	17.0	6.65	9.44	3.68	74.4	2.56	3.25	0.39	0.56	1.29
5228	0	80.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5225	0	72.9	0.27	0.055	7.45	4.85	13.5	8.80	65.9	1.54	3.01	0.65	0.45	1.64
	140	115	0.51	0.12	5.57	5.05	4.50	4.07	73.2	1.10	1.77	0.91	0.60	1.29
	600	28.1	0.32	0.39	9.68	10.7	2.49	2.74	78.3	0.91	1.89	1.10	0.72	1.82
	2100	12.3	0.003	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2535	12.6	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание: * — общий липидный экстракт (TLE, total lipid extract); “—” — анализ не проводился.
C₁₅₊₁₇₊₁₉ — маркер морского ОВ, C₂₇₊₂₉₊₃₁ — маркер терригенного ОВ, C₁₆₊₁₈+C₂₀₋₂₄ — маркер бактериально-преобразованного ОВ (напр. [27]).
ОЕРС₁₇₋₁₉ = 0.5 × (ОЕРС₁₇ + ОЕРС₁₉), ОЕРС₁₇ = (C₁₅ + 4 × C₁₇ + C₁₉)/(4 × C₁₆ + 4 × C₁₈), ОЕРС₁₉ = (C₁₇ + 4 × C₁₉ + C₃₁)/(4 × C₁₈ + 4 × C₃₀).
СРІ = 0.5 × [(C₂₅ + C₂₇ + C₂₉ + C₃₁ + C₃₃)/(C₂₄ + C₂₆ + C₂₈ + C₃₀ + C₃₂) + (C₂₅ + C₂₇ + C₂₉ + C₃₁ + C₃₃)/(C₂₆ + C₂₈ + C₃₀ + C₃₂ + C₃₄)] [37].
TAR = (C₂₇ + C₂₉ + C₃₁)/(C₁₅ + C₁₇ + C₁₉).

Таблица 3. Органо-геохимические индексы ОВ, рассчитанные на основе содержания *n*-алканов в пробах наилка (0–0.5 см) и поверхностных донных осадков, отобранных на меридиональном разрезе моря Лаптевых в сентябре 2015 г. Концентрации приводятся в мкг/г сухого вещества, в мкгС/г в пересчете на органический углерод и в % на сумму *n*-алканов.

№ станции	Тип объекта	5218		5220		5215-2	5223	5224		5228	5225
		наилко	донный осадок	наилко	донный осадок	донный осадок	донный осадок	наилко	донный осадок	донный осадок	донный осадок
Горизонт, см		0–0.5	0.5–2	0–0.5	0.5–2	0–3	0–1	0–0.5	0.5–1	0–2	0–2
C _{опт} , %		3.49	4.40	2.83	2.65	0.38	1.63	0.89	0.84	1.14	1.40
TLE, мкг/г		616	475	439	300	69.3	—	603	248	—	88.8
<i>n</i> -алканы, мкг/г		16.7	10.5	7.31	5.05	0.69	—	1.00	4.86	—	1.51
C ₁₅₊₁₇₊₁₉ , мкг/г		0.95	0.73	0.45	0.39	0.03	—	0.14	0.44	—	0.07
C ₂₇₊₂₉₊₃₁ , мкг/г		7.51	3.68	2.96	1.75	0.31	—	0.28	0.24	—	0.71
C ₁₆₊₁₈ +C ₂₀₋₂₄ , мкг/г		5.27	3.33	2.57	1.75	0.19	—	0.46	3.92	—	0.36
C ₁₅₊₁₇₊₁₉ , %		5.69	6.95	6.20	7.75	4.89	—	14.2	8.97	—	4.50
C ₂₇₊₂₉₊₃₁ , %		44.8	35.2	40.5	34.6	44.7	—	27.7	4.89	—	46.9
C ₁₆₊₁₈ +C ₂₀₋₂₄ , %		31.4	31.9	35.2	34.7	28.1	—	46.1	80.7	—	24.0
C ₁₅₊₁₇₊₁₉ /C ₂₇₊₂₉₊₃₁		0.13	0.20	0.15	0.72	0.11	—	0.52	1.84	—	0.10
ΣC ₁₂₋₂₄ / ΣC ₂₅₋₃₅		0.60	0.52	0.51	0.56	0.33	—	1.38	7.19	—	0.24
TAR		7.88	5.07	6.53	4.46	9.14	—	1.94	0.54	—	10.4
OEPC ₁₇₋₁₉		0.57	0.73	0.50	0.61	0.56	—	0.50	0.72	—	1.24
CPI		9.24	5.18	7.40	4.88	6.59	—	7.06	3.62	—	5.71
Pr/Phy*		1.23	1.13	1.23	1.10	2.06	—	0.84	0.86	—	1.84
<i>n</i> -алк., мкгС/г		480	237	259	190	183	—	113	581	—	108
C ₁₅₊₁₇₊₁₉ , мкгС/г		27.3	16.5	16.0	14.8	8.94	—	16.1	52.1	—	4.85
C ₂₇₊₂₉₊₃₁ , мкгС/г		215	83.6	105	65.9	81.7	—	31.2	28.4	—	50.5

Примечание.* — отношение изопреноидов пристана (Pr) к фитану (Phy); “—” — анализ не проводился.
Расчетные формулы для органо-геохимических индексов приведены в примечании к табл. 2.

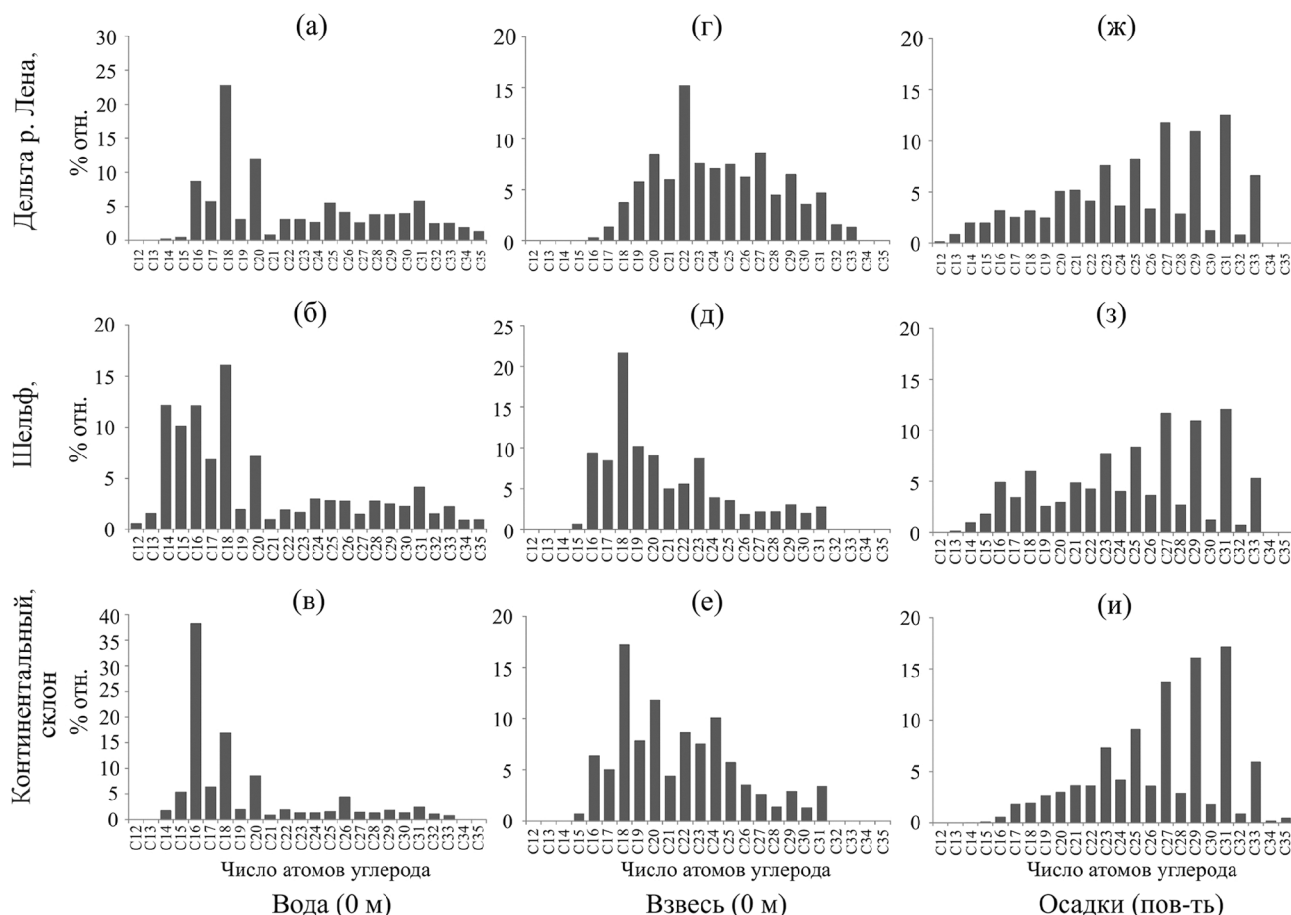


Рис. 2. Типичные распределения *n*-алканов в образцах воды (а, б, в), взвеси (г, д, е) и донных осадков (ж, з, и) на меридиональном разрезе в море Лаптевых в сентябре 2015 г. в % на сумму *n*-алканов.

пелитово-алевритовыми илами с содержанием фракции <63 мкм, превышающим 80%, согласно [28] (рис. 3в, 4б). Вблизи бровки шельфа (ст. 5223) осадки сложены плохо сортированным песчаным алевритом (коэф. сортировки 5.35) с примесью пелита (табл. 4, рис. 3в, 4б). Распределение размеров частиц приобретает полимодальный характер со средним значением 14.1 мкм (рис. 3 г, д). В составе поверхностных осадков на внешнем крае шельфа (ст. 5224, 5228) вновь отмечается преобладание хорошо сортированного песка со средним размером 189 и 122 мкм, соответственно. Это, вероятно, связано с вымыванием (неотложением) пелита и мелкого алеврита под действием активных гидродинамических процессов. На континентальном склоне (ст. 5225) (в соответствии с принципом циркумконтинентальной зональности) с увеличением глубины и расстояния от берега осадки становятся более тонкозернистыми, содержание песка снижается до 0%, средний размер зерен уменьшается до 5.17 мкм при коэффициенте сортировки 2.96 (табл. 4, рис. 3в–д,

4б). Распределение размеров частиц становится бимодальным (4.34 и 24.2 мкм).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Принято считать, что растворенное и взвешенное ОВ, поступающее в моря с речным стоком, существенно влияет на распределение и состав ОВ в морских донных осадках [12, 27]. Зона смешения речных и морских вод играет важную роль в осаждении различных форм ОВ, сорбции микроэлементов, дальности их распространения в акватории [8, 12].

Одним из показателей специфических различий компонентов исходного ОВ может служить распределение относительного содержания *n*-алканов в углеводородной фракции ОВ. ОВ морского типа обычно имеет максимумы распределения нечетных *n*-алканов в диапазоне C_{15} – C_{19} , а генетически связанное с высшей наземной растительностью — в диапазоне C_{25} – C_{35} . Бактериально-преобразованная составляющая

Таблица 4. Гранулометрический состав донных осадков и наилка в изученных образцах моря Лаптевых

№ станции	Тип образца	Интервал, см	Пелит (< 2 мкм), %	Алеврит (2–63 мкм), %	Песок (> 63 мкм), %
5218	Наилка	0–0.5	14.2	81.2	4.61
5218	Донный осадок	0.5–2	12.5	80.7	6.78
5220	Наилка	0–0.5	17.2	82.6	0.16
5220	Донный осадок	0.5–2	12.5	76.1	11.4
5215-2	Донный осадок	0–3	0	0	100
5223	Донный осадок	0–1	11.7	61.8	26.5
5224	Наилка	0–0.5	0	6.76	93.2
5224	Донный осадок	0.5–1	0	0.05	99.9
5228	Донный осадок	0–2	0	5.28	94.5
5225	Донный осадок	0–2	22.3	77.7	0

n-алканов приходится на C₁₆, C₁₈, C₂₀–C₂₄ [напр., 12, 27]. Поэтому отношение короткоцепочечных алканов к длинноцепочечным гомологам ($\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35}$, C₁₅₊₁₇₊₁₉/C₂₇₊₂₉₊₃₁, TAR) отражает вклад ОВ различного генезиса. В геохимическом плане особый интерес представляют индексы нечетности CPI, OEP₁₇, OEP₁₉, указывающие на степень диагенетических преобразований ОВ [27, 37]. Для определения окислительно-восстановительной обстановки осадконакопления используется отношение изопреноидов пристана (Pr) к фитану (Phy) [37].

Органо-геохимические маркеры РОВ и ВОВ. В направлении от дельты р. Лены к континентальному склону зафиксировано уменьшение концентраций РОУ и фракции липидов в нем при возрастании доли *n*-алканов в составе ОВ. Молекулярный и групповой состав *n*-алканов показывает, что в дельте РОВ сформировано смешанным автохтонно-аллохтонным органическим материалом, образованным морской биотой и остатками высших растений. На шельфе и континентальном склоне РОВ представлено преимущественно автохтонным веществом (рис. 2). Это маркирует процессы обогащения растворенного ОВ соединениями морского генезиса, тесно связанными с динамическим изменением состава планктонных сообществ во фронтальных зонах [15]. На шельфе и континентальном склоне концентрации *n*-алканов морского и терригенного генезиса остаются практически постоянными, что может быть связано с предельной растворимостью исследуемых соединений в данном типе вод. Значения индексов нечетности низко- и высокомолекулярных гомологов *n*-алканов (OEP_{17–19} < 1, CPI < 1, табл. 2) в поверхностном слое воды, а также последовательное возрастание концентраций компонент бактериальной деструкции

при движении в область континентального склона, указывают на достаточно высокую активность микроорганизмов в условиях низких температур в море Лаптевых.

Характер распределения ВОУ моря Лаптевых согласуется с другими морями Арктического бассейна, где концентрации ВОУ также уменьшаются при движении от области речных выносов к мористой части и от поверхности ко дну [1, 9, 13, 34, 38, 43]. Обращает на себя внимание ст. 5215-2, где выявлен целый ряд физико-химических, гидрологических и биологических особенностей в период проведения работ. По результатам исследований Сухановой с соавт. [15] на ст. 5215-2 выявлены самые высокие для шельфа численность (2011×10^6 кл/м²) и биомасса фитопланктона (97 мг/м³). Среди водорослей доминирует морской диатомовый комплекс. Содержания хлорофилла “а”, ВОУ и РОУ в поверхностном слое воды максимальные для шельфа (табл. 1, 2). Наблюдаются уменьшение глубины пикногалоклина и обогащение эвфотической зоны биогенными элементами [14]. Поверхностная температура на 1–1.5°C ниже, а соленность на 4–6 psu выше, чем на соседних станциях. Здесь изучался вертикальный поток вещества с помощью седиментационных ловушек [5]. На основании измеренных величин валового потока вещества (19600 мг/м²/сут), в работе [5] предполагается, что в данной области наблюдается лавинное осаждение взвеси из-за резкого изменения солёности [14, 15, 36].

Согласно результатам изучения молекулярного состава и распределения *n*-алканов, по направлению от залива Буор-Хая к континентальному склону в составе ВОВ, также как и в РОВ, снижается доля терригенного ОВ и доминируют планктоногенная и бактериально-преобра-

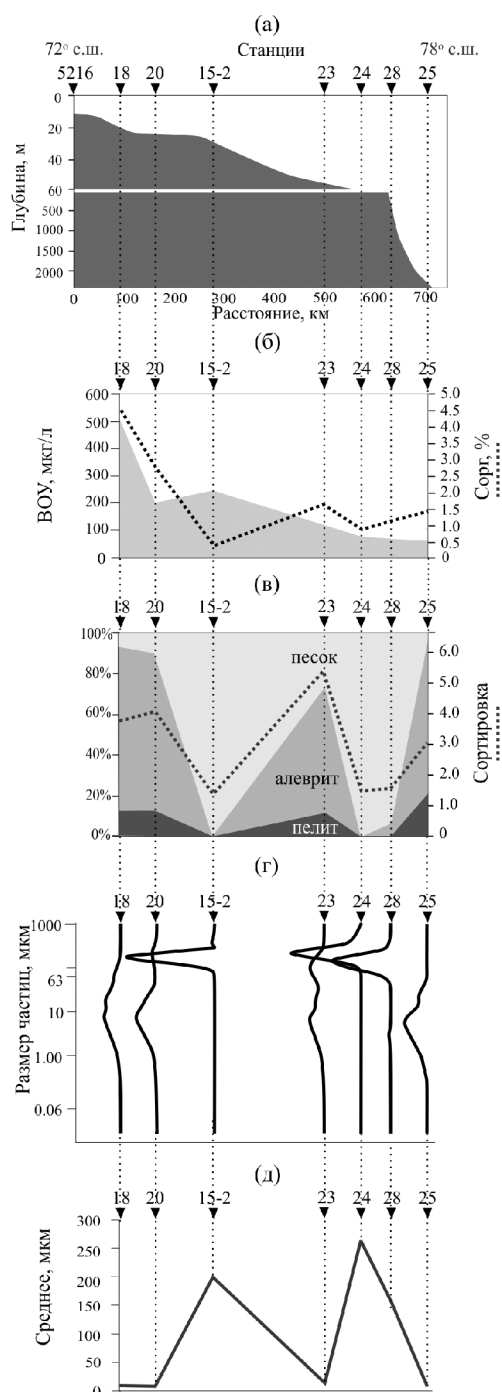


Рис. 3. Распределение различных показателей на профиле р. Лена — континентальный склон в 2015 г. Батиметрический профиль от области выноса р. Лены до континентального склона моря Лаптевых с указанием станций пробоотбора (а). Распределение концентраций ВОВ в поверхностном слое воды (серая заливка) и содержание $C_{\text{орг}}$ в поверхностных осадках в расчёте на их сухую массу (пунктир) (б). Гранулометрический состав поверхностных донных осадков (0–2 см) и коэффициент сортировки частиц (в). Кривые распределения размеров частиц поверхностных донных осадков (г). Изменение среднего размера частиц поверхностных осадков по разрезу (рассчитано по [31]) (д). Вертикальной пунктирной линией показано расположение станций отбора проб.

зованная компоненты. Изменение состава ОВ ($\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 0.92$ в заливе, 4.00 на шельфе и 3.01 на континентальном склоне) согласуется с вариациями распределения первичной продукции, концентраций хлорофилла “а” (табл. 1) и состава фитопланктонных сообществ [15]. Преобладание маркеров биогенного вещества во взвеси на примыкающем к заливу шельфе также было зафиксировано и описано в работе [34]. Это может быть связано с поставкой новообразованного ОВ из локализованного в этой области биологического фронта. Терригенная составляющая ОВ взвеси представлена соединениями с высокой степенью бактериальной трансформации ($CPI = 1.37$, в среднем). По изменению состава *n*-алканов и органо-геохимических индексов четко прослеживается изменение состава ВОВ в результате активно идущих микробиологических процессов, которые особенно заметны на глубоководных горизонтах ст. 5225, где основную долю ОВ составляют компоненты бактериальной деструкции ОВ. Начиная с глубины 2100 м и до дна, ОВ содержится уже в следовых количествах, и *n*-алканы отсутствуют на хроматограммах.

Из результатов изучения гранулометрического состава донных осадков следует, что из р. Лены выносятся хорошо сортированный грубозернистый материал, характеризующийся низким содержанием $C_{\text{орг}}$ (рис. 4а). На изменение гранулометрического состава осадков и степени их сортировки на изученном разрезе помимо влияния стока р. Лена могла оказывать влияние эрозионно-аккумулятивная деятельность придонных течений. Полученные данные подтверждают значительную латеральную изменчивость условий осадконакопления в районе исследования. Выявлены существенные вариации гранулометрического состава осадков на изученном разрезе. В частности, обнаружены участки дна, на которых содержание песка в осадках достигает 100% (рис. 4б). Распространение песков на шельфе в районе исследования также было описано в работах [28, 32]. Изменения гранулометрического состава наилка (0–0.5 см) повторяют характер вариаций состава поверхностных осадков на изученном разрезе (табл. 4).

Вариации состава ОВ донных отложений и органо-геохимические маркеры его трансформации. К процессам, контролирующим поток ОВ в море Лаптевых и на примыкающем к нему континентальном склоне, относятся: речной вынос; эрозия берегов; перенос осадочного вещества вниз по склону под действием гравитационных потоков; первичный синтез ОВ морской биотой; деятельность придонных течений [13, 43]. Арктический климат в сочетании с геологическим строением

областей сноса, динамикой и химией вод определяет характер осадочного материала, а также особенности биогеохимических и диагенетических процессов [29, 33, 43]. Основная масса ОВ, достигшая дна, разлагается/растворяется до конечных биогенных элементов на границе водадно и в поверхностном слое осадков [12, 25, 27]. Эти процессы зависят от глубины бассейна, скорости терригенной и биогенной седиментации, состава и величины латеральных и вертикальных потоков, микробиологической активности - факторов, определяющих среду осадконакопления [напр., 12, 27]. В море Лаптевых, как в Карском и Восточно-Сибирском, основное осаднение $C_{орг}$ происходит в эстуарно-дельтовых и приконтинентальных зонах, где формируется мощная зона накопления осадочного материала и $C_{орг}$ донных осадков [1, 2, 20, 23, 30, 44]. Карбонатный углерод ($C_{карб}$) в отложениях обнаружен не был. $C_{орг}$ в донных осадках является по массе основным компонентом углеродного цикла. Это характерная черта осадков арктических морей и важная особенность осадконакопления в северной полярной зоне [13]. Полученные содержания $C_{орг}$ подчиняются характерной для осадков Арктического бассейна закономерности увеличения концентрации в системе песок — алевроит — пелит (рис. 4) [13, 42]. Сопоставление значений $C_{орг}$ и TLE (табл. 3) в целом показывает их пропорциональное изменение.

В образцах осадочных отложений, в отличие от образцов воды и взвеси, в составе ОВ преобладают соединения, генетически связанные с наземной растительностью, о чем свидетельствуют значения индекса $C_{15+17+19}/C_{27+29+31} < 1$. Преобладание четных гомологов *n*-алканов в низкомолекулярной области ($OEP_{17-19} = 0.60$, в среднем) отражает значительные диагенетические преобразования морского ОВ. Обстановка осадконакопления окислительная, о чем свидетельствует отношение изопреноидов пристана к фитану ($Pr/Phy > 1$). На ст. 5225, расположенной в глубоководной области на континентальном склоне, в алевро-пелитовых отложениях скорости процессов бактериальной трансформации ОВ замедлены из-за значительной глубины. Это привело к повышенным значениям индекса $OEP_{17-19} = 1.24$. По разрезу в изученных осадках значение индекса нечетности *n*-алканов терригенного генезиса ($CPI = 6.21$, в среднем) указывает на незначительную степень деградации континентального ОВ.

В наилке из дельты р. Лены (ст. 5218) и на шельфе (ст. 5220) выявлены повышенные по сравнению с поверхностными осадками значения концентраций ОВ. Так же, как и в подстилающих осадках, в составе ОВ наилка доминируют

соединения терригенного генезиса. Органо-геохимические индексы и распределения *n*-алканов сопоставимы между этими станциями (табл. 3, рис. 5). Подобная картина была описана в работе [7] по Карскому морю, что свидетельствует о сходстве процессов трансформации ОВ при переходе от наилка к осадку.

Исключение составляет расположенная на внешнем шельфе ст. 5224, где выявлен высокий градиент изменений качественных и количественных характеристик ОВ при переходе наилок-подстилающий осадок (табл. 3, рис. 5в). Концентрация ОВ в наилке сопоставима с таковой для наилка в дельте р. Лены и составляет 606 мкг/г. Распределение *n*-алканов здесь носит выраженный бимодальный характер. В наилке значительно возрастает по сравнению с другими станциями разреза доля гомологов планктоногенного генезиса (14 %) и отношение $\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 1.38$. Схожая картина распределения *n*-алканов с четкими маркерами планктоногенного ОВ в осадках приводится в работе [3], где пробы донных осадков были отобраны в районе внешнего шельфа осенью 2011 г. Станции отбора были расположены вблизи наших станций 5223 и 5224. Высокие значения содержания морского ОВ в данном районе, вероятно, связаны с подледным цветением. Значительная поставка на дно подледных диатомовых водорослей была зафиксирована ранее в районе между 82° и 89° с.ш. и описана в работе [21].

Известно, что в наилке резко возрастают величины общей численности микроорганизмов и интенсивность микробных процессов [7]. При переходе в зону подстилающего осадка на ст. 5224 доля маркеров гидробионтного ($C_{15+17+19}$) и терригенного ($C_{27+29+31}$) ОВ суммарно составляет всего 14%. Максимум концентраций приходится на средне-молекулярную область, маркирующую активно идущие процессы биodeградации ОВ ($\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 7.19$) (рис. 5в). Доля компонент бактериальной деструкции здесь максимальна на всем разрезе и составляет 46% для наилка и 81% для подстилающего горизонта 0.5–1 см. Вероятно, в наилке происходит активизация процессов биodeградации ОВ и в подстилающих его песчаных осадках накапливаются компоненты бактериальной деструкции ОВ. Континентальное ОВ в осадках на ст. 5224 практически не аккумулируется. Об интенсификации микробиологических процессов в осадках в этом районе также свидетельствуют повышенные значения численности бактерий, их биомассы и концентрации свободных аминокислот [22]. Исследования проводились авторами в сентябре, поэтому сопоставление результатов с результатами нашей работы правомерно.

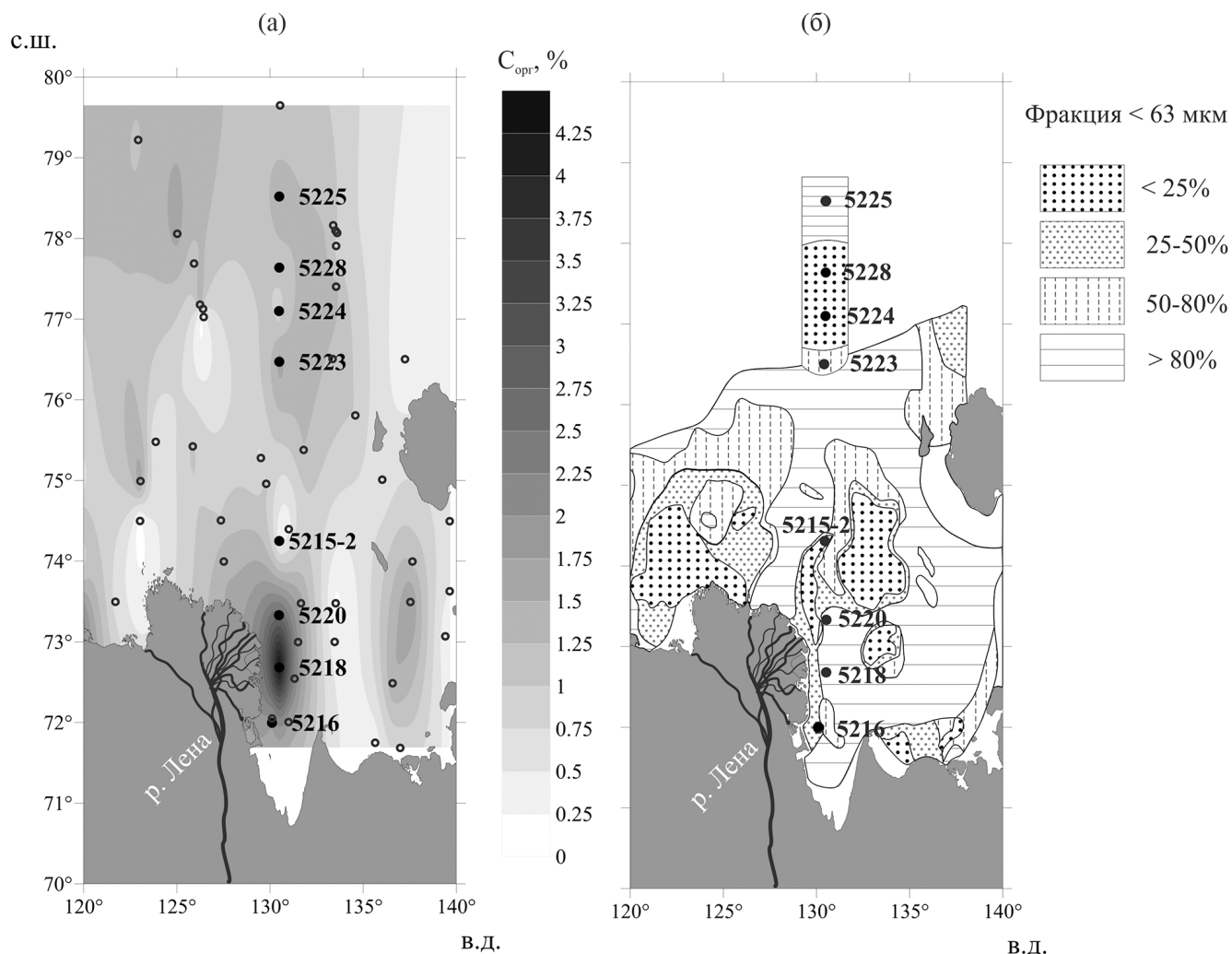


Рис. 4. Содержание $C_{орг}$ (а) и распределение фракции < 63 мкм (б) в поверхностных донных осадках по собственным и литературным данным ([28, 32] с изменениями и дополнениями). Открытыми точками показаны литературные данные.

Полученный в сентябре 2015 г. комплекс данных на ст. 5215-2 наглядно демонстрирует сложность и неоднозначность взаимосвязи биологических, биогеохимических, гидрофизических и седиментационных процессов. Как было описано выше, станция расположена в зоне лавинной седиментации вещества. Здесь в поверхностном слое воды зафиксированы максимальные для шельфа значения BOY , а поток $C_{орг}$ составлял $464 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ [5]. В составе углеводородов POY и BOY преобладают n -алканы морского генезиса, при незначительной доле терригенного $ОВ$ (8% и 9% соответственно). Ожидалось, что параметры $ОВ$ в осадках будут соответствовать данному режиму седиментации — высокие содержания $C_{орг}$ и $ОВ$, высокая доля соединений морского генезиса, повышенные значения индексов OEP_{17-19}

и CPI . Однако проведенные исследования показывают минимальные на разрезе значения $C_{орг}$ (0.38%), концентрации $ОВ$ (69.3 мкг/г), n -алканов (0.69 мкг/г) и маркеров морской биоты ($C_{15+17+19}/C_{27+29+31} = 0.11$, $\Sigma C_{12-24}/\Sigma C_{25-35} = 0.33$). В условиях малой глубины (26 м) и значительного количества оседающего вещества, полная биodeградация оседающего $ОВ$ в результате бактериальной деструкции маловероятна. При этом в осадках, представленных на 100% грубозернистой песчаной фракцией, показаны значительные концентрации слабо преобразованного континентального $ОВ$ ($CPI = 6.59$, $C_{27+29+31} = 81.7 \text{ мкгС/г}$). Объяснением такого эффекта может быть активная деятельность придонных течений, однако данные, подтверждающие или опровергающие это предположение, отсутствуют.

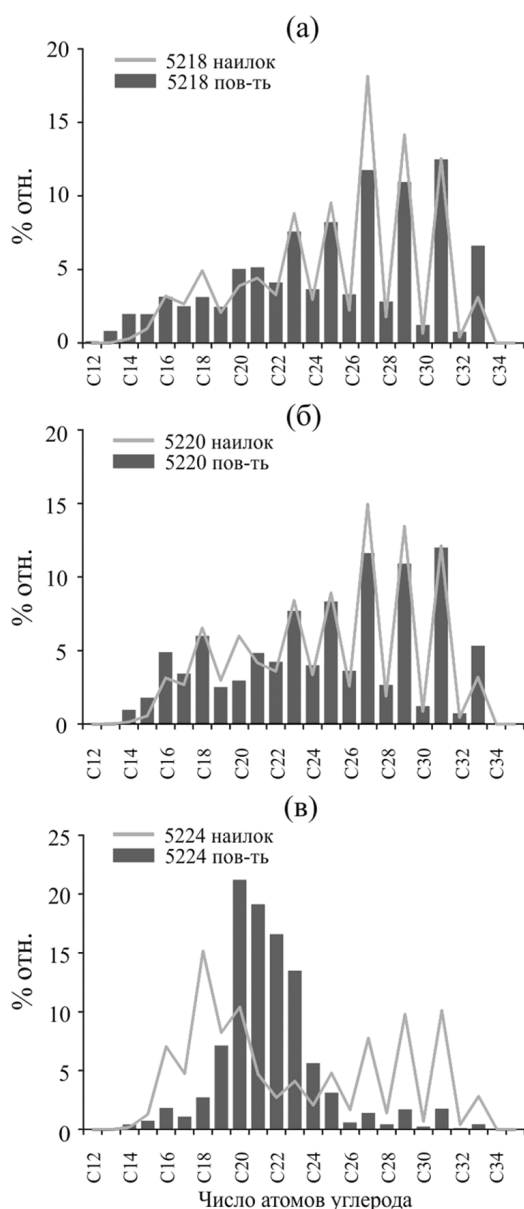


Рис. 5. Распределение *n*-алканов в наилке (0–0.5 см) и подстилающих донных осадках, отобранных: (а) в дельте р. Лена, ст. 5218; (б) на шельфе, ст. 5220; (в) на континентальном склоне, ст. 5224 меридионального разреза моря Лаптевых в сентябре 2015 г. в % на сумму *n*-алканов.

Таким образом, четкие градиенты были выявлены и прослежены на расстоянии 700 км от берега, как в источниках поставки, так и в степени деградации ОВ водной толщи, наилка и поверхностных донных осадков. Подобная разница была обнаружена и описана в работе Карлссон и др. [34] при исследовании образцов взвеси и осадков в заливе Буор-Хая. В указанной работе авторы предполагают, что во взвеси переносится терригенное ОВ почв и наземной растительности, обладающее малой устойчивостью и более высокой биодоступ-

ностью. В донных осадках, наоборот, происходит накопление устойчивого к деградации терригенного ОВ, ассоциированного с минеральными частицами термоабразии берегового комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На меридиональном разрезе в восточной части моря Лаптевых (63-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”, сентябрь 2015 г.) определены содержание органического углерода и состав нормальных углеводородов в воде, взвеси, наилке и донных осадках. Одновременное исследование качественного и количественного составов *n*-алканов в этих объектах на одних и тех же станциях на разрезе р. Лена — континентальный склон было проведено впервые. На основании аналитических определений и литературных данных прослежены источники поставки и пути трансформации ОВ.

В предыдущих работах неоднократно было показано преобладание терригенного ОВ в осадках моря Лаптевых. Приведенные в данной работе результаты полностью подтверждают этот вывод. При этом ранее неоднократно отмечалось, что на формирование состава ОВ донных осадков существенное влияние оказывает ОВ, поступающее с речным стоком в растворенной и взвешенной формах. Полученные нами результаты показывают принципиальное отличие составов ОВ растворенной и взвешенной форм от состава ОВ донных осадков. Согласно изученным геохимическим маркерам, в РОВ и ВОВ наблюдается тренд на увеличение доли морского ОВ с увеличением дистанции от берега. При этом терригенное ОВ водной толщи имеет минорные концентрации и значительно преобразовано. Однако на тех же станциях в донных осадках накапливается устойчивое терригенное ОВ с низкой степенью диагенетической трансформации. Отсутствие маркеров гидробионтов в осадках является следствием разложения морского ОВ в толще воды, что приводит к сравнительно меньшему поступлению в них автохтонного материала. Исключение составляет ст. 5224 (внешний шельф), где выявлены признаки экспорта биомассы водорослей из тающего арктического морского льда.

Из полученных результатов следует, что ОВ вод речного стока р. Лены в летний период не способствует формированию ОВ донных осадков. Оно формируется за счет других механизмов, недостаточно изученных к настоящему моменту. Это может быть поставка материала с водами паводкового стока р. Лены, переотложение под действием придонных течений, ледовый разнос или совокупность этих процессов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают свою благодарность Н.В. Лобусу за предоставленный материал для исследований, Н.А. Беляеву, Д.Г. Борисову за ценные рекомендации при интерпретации результатов, научному составу и экипажу НИС “Академик Мстислав Келдыш”, начальнику экспедиции академику М.В. Флинту.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № FMWE-2024-0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // *Геохимия*. 2008. № 2. С. 183–195.
3. Гершелис Е.В. Геохимические особенности органического вещества донных осадков в морях Восточной Арктики : Дисс. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.09 Томск, 2018. 143 с.
4. Демидов А.Б., Гагарин, В.И., Арашкевич, Е.Г. и др. Пространственная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в море Лаптевых в августе–сентябре // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 5. С. 755–770.
5. Дриц А.В., Кравчишина М.Д., Пастернак А.Ф. и др. Роль зоопланктона в вертикальном потоке вещества в Карском море и море Лаптевых в осенний сезон // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 6. С. 934–948.
6. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Кассенс Х. и др. М.: Изд-во МГУ, 2009. 608 с.
7. 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.
8. Лисицын А.П. Маргинальные фильтры и биофильтры Мирового океана // *Океанология на старте XXI века*. М.: Наука, 2008. С. 159–224.
9. Немировская И.А. Распределение и происхождение углеводородов на трансарктическом разрезе через моря Сибири // *Океанология*. 2021. Т. 62. № 2. С. 209–219.
10. Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В. и др. Геохимия полициклических ароматических углеводородов донных осадков Восточно-Арктического шельфа // *Океанология*. 2008. Т. 48. С. 215–223.
11. Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В. и др. Геохимия органического вещества донных отложений Центрально-Арктических поднятий Северного Ледовитого океана // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. С. 113–125.
12. Романкевич А. Е., Ветров А. А. Углерод в мировом океане. М.: ГЕОС. 2021. 352 с.
13. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
14. Степанова С.В., Полухин А.А., Костылева А.В. Гидрохимическая структура вод в восточной части моря Лаптевых осенью 2015 г. // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 67–74.
15. Суханова И.Н., Флинт М.В., Георгиева Е.Ю. и др. Структура сообществ фитопланктона в восточной части моря Лаптевых // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 86–102.
16. Флинт М.В., Арашкевич Е.Г., Артемьев В.А. и др. Экосистемы морей Сибирской Арктики. Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. М.: АПР, 2018. 232 с.
17. Alling V., Sanchez-Garcia L., Porcelli D. et al. Nonconservative behavior of dissolved organic carbon across the Laptev and East Siberian seas // *Global Biogeochem. Cycles*. 2010. V. 24. P. 1–15.
18. Alling V., Porcelli D., Mörrth C.-M. et al. Degradation of terrestrial organic carbon, primary production and out-gassing of CO₂ in the Laptev and East Siberian Seas as inferred from $\delta^{13}\text{C}$ values of DIC // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2012. V. 95. P. 143–159.
19. Amundsen H., Anderson L., Andersson A. et al. AMAP assessment 2013: Arctic Ocean acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme // AMAP, 2013. P. 111.
20. Belyaeva A.N., Eglinton G. Lipid biomarker accumulation in the Kara Sea sediments // *Oceanology*. 1997. V. 37. P. 634–642.
21. Boetius A., Albrecht S., Bakker K. et al. Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice // *Science*. 2013. № 339. P. 1430–1432.
22. Boetius A., Damm E. Benthic oxygen uptake, hydrolytic potentials and microbial biomass at the Arctic continental slope // *Deep Sea Res. Part I*. 1998. № 45. P. 239–275.
23. Bröder L., Tesi T., Andersson T.I. et al. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea // *Org. Geochem*. V. 91. P. 16–30.
24. Bröder L., Tesi T., Salvadó J.A. et al. Fate of terrigenous organic matter across the Laptev Sea from the mouth of the Lena River to the deep sea of the Arctic interior // *Biogeosciences*. 2016. V. 13. P. 5003–5019.
25. Burdige D.J. Preservation of organic matter in marine sediments: controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets? // *Chemical reviews*. 2007. V. 107. № 2. P. 467–485.
26. Damm E., Bauch D., Krumpen T. et al. The transpolar drift conveys methane from the siberian shelf to the central Arctic Ocean // *Sci. ReP*. 2018. V. 8. P. 1–10.

27. Eglinton T.I., Repeta D.J. Marine organic geochemistry // Treatise on Geochemistry, 2004 P. 145–180.
28. Fahl K., Stein R. Modern organic carbon deposition in the Laptev Sea and the adjacent continental slope: Surface water productivity vs. terrigenous input // Org. Geochem. 1997. V. 26. P. 379–390.
29. Fahl K., Stein R. Modern seasonal variability and deglacial/Holocene change of central Arctic Ocean sea-ice cover: New insights from biomarker proxy records // Earth Planet. Sci. Lett. 2012. P. 123–133.
30. Fernandes M.B., Sicre M.-A. The importance of terrestrial organic carbon inputs on Kara Sea shelves as revealed by n-alkanes, OC and $\delta^{13}\text{C}$ values // Org. Geochem. 2000. V. 31. P. 363–374.
31. Folk R.L., Ward W.C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters // Journal of sedimentary petrology. 1957. V. 27. P. 3–26.
32. Gershelis E., Grinko A., Oberemok I. et al. Composition of sedimentary organic matter across the Laptev Sea shelf: Evidences from Rock-Eval parameters and molecular indicators // Water. 2020. V. 12, 3511.
33. Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S. et al. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // American Journal of Science. V. 296. P. 664–691.
34. Karlsson E.S., Charkin A., Dudarev O. et al. Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of terrestrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 1865–1879.
35. Macdonald R.W., Sakshaug E., Stein R. The Arctic Ocean: Modern status and recent climate change // In: Stein R., Macdonald R.W. (Eds.). The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 6–21.
36. Osadchiv A., Silvestrova K., Myslenkov S. Wind-driven coastal upwelling near large river deltas in the Laptev and East-Siberian seas // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 5. P. 844.
37. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide. Cambridge University Press. 2005. 1155 p.
38. Sánchez-García L., Alling V., Pugach S. et al. Inventories and behavior of particulate organic carbon in the Laptev and East Siberian seas // Global Biogeochem. Cycles. 2011. V. 25. P. 1–13.
39. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Pipko I.I. et al. Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of the Laptev Sea // Biogeosciences. 2013. V. 10. P. 5977–5996.
40. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // Nature Geosci. 2014. V. 7. P. 64–70.
41. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // Phil. Transactions of the Royal Soc. A: Math., Phys. and Eng. Sci. V. 373. P. 20140451.
42. 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: Springer-Verlag, 2004. P. 213–237.
43. Stein R. Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Elsevier, 2008. 591 p.
44. Tesi T., Semiletov I., Hugelius G. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes. // Geochim. Cosmochim. Acta. 2014. V. 133. P. 235–256.
45. van Dongen B.E., Semiletov I., Weijers J.W.H. et al. Contrasting lipid biomarker composition of terrestrial organic matter exported from across the Eurasian Arctic by the five great Russian Arctic rivers // Global Biogeochem. Cycles. 2008. V. 22(1).
46. Vonk J.E., Sánchez-García L., Van Dongen B.E. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia // Nature. 2012. № 489. P. 137–140.
47. Yunker M.B., Macdonald R.W., Snowdon L.R. et al. Alkane and PAH biomarkers as tracers of terrigenous organic carbon in Arctic Ocean sediments // Org. Geochem. 2011. V. 42. P. 1109–1146.

GEOCHEMICAL MARKERS OF ORGANIC MATTER TRANSFORMATION IN THE EASTERN PART OF THE LAPTEV SEA

N. A. Shulga^{a,*}, E. A. Romankevich^a, N. V. Vylegzhanina^b, E. A. Streltsova^a,
V. Yu. Fedulov^a, and A. V. Polyakova^b

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

^b Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^{*}e-mail: nash.ocean@gmail.com

The sources of supply and transformation of organic matter (OM) during the transition from the dissolved form to suspension, fluffy and bottom sediments on the meridional transect from the Lena River delta to the continental slope were described (depths from 10 to 2390 m, cruise 63 of the R/V Akademik Mstislav

Keldysh, September 2015). The results of the study of OM molecular markers showed that dissolved and suspended OM of marine and terrigenous origin biodegrades in the water column and practically does not accumulate in bottom sediments. Thus, OM of the Lena river runoff does not contribute to the formation of OM in the bottom sediments in the summer period. On the outer shelf, an area of influence of ice bloom on the sedimentation process was revealed.

Keywords: Laptev Sea, *n*-alkanes, organic matter, bottom sediments, geochemistry, Arctic