

УДК 551.35

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДОННЫХ ОСАДКОВ ЧАУНСКОЙ ГУБЫ (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ)

Полтавская Наталина Александровна¹,
geoikigai@tpu.ru

Гершелис Елена Владимировна¹,
elenapanova@tpu.ru

Оберемок Ирина Андреевна¹,
genuine.i@yandex.ru

Гринько Андрей Алексеевич²,
andreyagrinko@gmail.com

Чаркин Александр Николаевич²,
charkin@poi.dvo.ru

Ярошук Елена Игоревна²,
e.yaroshchuk@poi.dvo.ru

Дударев Олег Викторович²,
dudarev@poi.dvo.ru

Смирнова Наталья Александровна¹,
smirnova@hw.tpu.ru

Гусева Наталья Владимировна¹,
gusevanv@tpu.ru

Семилетов Игорь Петрович^{2,1},
ipsemiletov@alaska.edu

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

Актуальность исследования определяется необходимостью оценки региональных особенностей транспорта и преобразования органического вещества в различных седиментационных и биогеохимических обстановках, действующих на Восточно-Сибирском арктическом шельфе, в том числе в Восточно-Сибирском море – наиболее ледовитом и наименее изученном море Российской Арктики.

Цель исследования заключается в определении состава и источников органического вещества донных осадков Чаунской губы (Восточно-Сибирское море).

Объекты: 25 проб поверхностных донных осадков, отобранных по профилю от прибрежной зоны Чаунской губы до внутренней части шельфа Восточно-Сибирского моря в ходе комплексной научно-исследовательской морской экспедиции на борту НИС «Академик Опарин» в сентябре–октябре 2020 г.

Методы. Для анализа групп углеводородных соединений ОВ донных осадков был применен пиролитический анализ по методу Rock-Eval; оценка распределения *n*-алканов проводилась на основе результатов газовой хромато-масс-спектрометрии. Гранулометрический анализ осадков выполнялся на лазерном анализаторе частиц.

Результаты. Состав осадочного материала в Чаунской губе преимущественно определяется особенностями подводного рельефа и гравитационными потоками поступающего терригенного материала – продуктов локальной термоабразии береговой зоны (о. Айон) и речного аллювия в юго-восточной части губы. Определенную роль в формировании седиментационного облика губы, предположительно, играют процессы вытаявания криозоля в результате разрушения областей припайного льда. Данные пиролиза и анализ распределения *n*-алканов для поверхностных осадков указывают на смешанный генезис органического вещества в поверхностных осадках с доминирующим вкладом наземного органического вещества высокой степени преобразованности и высокое содержание трудноразлагаемых гуминовых веществ и фульвокислот. Присутствие автохтонного органического вещества отражает высокую продуктивность вод Чаунской губы.

Ключевые слова:

органический углерод, донные осадки, пиролиз, молекулярный анализ, гранулометрический анализ, Чаунская губа, Восточно-Сибирское море, Арктика.

Введение

Наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения наиболее ярко проявляются в арктическом регионе, оказывая беспрецедентное влияние на функционирование системы климат–углерод–криосфера. Усиление глобального потепления провоцирует интенсивную дестабилизацию подводной и наземной мерзлоты и высвобождение больших объемов органического углерода (ОУ) [1, 2]. Активное вовлечение «мерзлотного» углерода в современный биогеохимический цикл может привести к серьезным экологическим последствиям планетарного масштаба, в том числе к увеличению эмиссии метана в атмосферу [3] и асидификации вод арктических морей [4].

Восточно-Сибирский арктический шельф (ВСШ) – крупнейший континентальный шельф Мирового океана – представляет собой уникальную природную лабораторию для изучения транспорта и трансформации терригенного ОУ. В воды ВСШ поступают большие объемы наземного ОУ как за счет стока Великих Сибирских рек (Лена, Индигирка, Колыма), так и за счет интенсивной эрозии берегового ледового комплекса (Едома). Так, с продуктами береговой эрозии в воды ВСШ ежегодно выносятся около 44 ± 10 Мт наземного ОУ [5]. При этом наиболее вероятно, что в будущем этот объем будет только возрастать вследствие уменьшения площади ледового покрова и увеличения волновой активности [6–10].

Для формирования объективной оценки роли ОУ, высвобождаемого из мерзлотных толщ, в арктическом цикле углерода необходимо оценить региональные особенности его транспорта и преобразования в различных седиментационных и биогеохимических обстановках, действующих на ВСМ. В этом контексте наиболее изученным районом ВСМ является море Лаптевых, в воды которого поступает осадочный материал, переносимый со стоком реки Лены, а также продукты активного разрушения берегового ледового комплекса [11–13]. Восточно-Сибирское море (ВСМ), наиболее ледовитое и наиболее труднодоступное море Северного Ледовитого океана (СЛО), характеризуется значительно меньшей изученностью.

Предыдущие исследования геохимии донных осадков ВСМ преимущественно были направлены на исследование пространственного распределения ряда геохимических индикаторов [14–17] или на более детальное изучение молекулярного состава органического вещества (ОВ) вдоль профилей берег–шельф, прослеживающих влияние рек Индигирки и Колымы [1, 18, 19]. В данной работе мы впервые приводим данные по составу ОВ осадков Чаунской губы – полузамкнутой аккумулятивной зоны на востоке ВСМ, где влияние речного стока ограничено и, по имеющимся данным, отсутствует субаквальная мерзлота, а термоабразия берегов носит зональный характер [20–22]. В данной работе был исследован молекулярный состав ОВ (распределение *n*-алканов и данные пиролиза Rock-Eval) для оценки его источников и степени преобразованности, а также гранулометрический состав поверхностных донных осадков для уточнения особенностей седиментации исследуемого района.

Материалы и методы исследований

Район исследования

ВСМ представляет собой окраинное мелководное шельфовое море СЛО общей площадью 913 тыс. км², примерно 70 % акватории занимают глубины не более 50 м [23]. На формирование природного облика ВСМ влияет материковый сток рек Индигирка, Колыма и Алазея (250 км³/год). Тем не менее к ключевым особенностям биогеохимии ВСМ следует отнести региональные факторы. Западная часть ВСМ, граничащая с морем Лаптевых, характеризуется сильным влиянием речного стока и продуктов береговой эрозии (западная биогеохимическая провинция). С восточной стороны ВСМ граничит с Чукотским морем, откуда проникают тихоокеанские воды, обогащенные биогенными веществами и повышающие уровень первичной продукции в летний период (восточная биогеохимическая провинция) [14].

Побережье моря различно по рельефу и строению на разных участках. Большая часть западного материкового побережья ВСМ сложена верхнечетвертичными, аллювиальными, озерными, местами морскими отложениями, скванными многолетней мерзлотой, что способствует образованию солифлюкационных и термоабразивных типов берегов, получивших наибольшее развитие в Колымско-Чаунской береговой зоне и на о. Айон [24]. Берега Восточной Шелагско-

Биллингской области в основном абразионно-аккумулятивные и аккумулятивные, причем подводный склон здесь относительно крутой [24]. Побережье ВСМ достаточно изрезано и образует разнообразные заливы, губы, бухты, полуострова и мысы. Район данного исследования, Чаунская губа, располагается в юго-восточной части бассейна ВСМ.

Чаунская губа – аккумулятивная акваториальная система с полузамкнутым водообменом (подобно Омудляхской и Хромской губам ВСМ), занимающая площадь 9180 км² и углубляющаяся в материк более чем на сто километров. С запада на восток достигает максимальной ширины 95 км. Чаунская низменность окружена хребтами Анюйско-Чукотской горной области и открыта через Чаунскую губу в ВСМ. Площадь низменности представляет собой плоскую озерно-аллювиальную равнину дельтовой области рек, текущих с Анадырского плоскогорья, Анюйского и Чукотского нагорий. В губу впадает множество мелких рек (Паляваам, Чаун, Пучъэвеем, Лелювеем, Ичүвеем, Млелювеем) с суммарным годовым стоком порядка 9 км³/год [25], что отличает ее от заливов морей Восточной Арктики, принимающих сток крупнейших сибирских рек (Лена, Индигирка, Колыма). Нижнее течение рек образует на юго-западном берегу Чаунской губы заболоченную низину, которая характеризуется многочисленными рукавами и протоками, старицами, термокарстовыми озерами. На восточных и западных берегах Чаунской губы гидросеть более разрежена [26]. Основным течением в Чаунской губе является циклоническая циркуляция вод, поступающих в западную часть, опресненных за счет стока р. Колымы и других рек [25]. Термоабразия береговой зоны вдоль всей акватории Чаунской губы не повсеместна. Согласно данным [24], наиболее развиты солифлюкационные и термоабразивные типы берегов на Колымско-Чаунской береговой зоне и на о. Айон, вплоть до северо-восточной береговой зоны (район г. Певек). Абразионно-аккумулятивные и аккумулятивные берега начинаются от Певека, захватывают мыс Шелагский и далее идут в сторону Чукотского моря до пролива Лонга, причем подводный склон здесь относительно крутой [24].

Глубина Чаунской губы сравнительно небольшая, со средними значениями 15 м. Максимальная глубина наблюдалась в центральной части губы (16 м); минимальная – в районе приустьевой зоны выхода рек Пучъэвеем, Чаун-Паляваам (9 м). По данным работ А.П. Валпетера [27], донный рельеф Чаунской губы и часть прилегающего шельфа ВСМ представляют собой затопленную морем и лишь частично переработанную волнами поверхность озерно-аллювиальной тундровой равнины. Субазальный рельеф на дне акватории губы и в прибрежной части шельфа представлен фрагментами долин дельты рек, впадинами термокарстовых озер, эоловыми образованиями, морозобойными трещинами и другими криогенными формами. Реликты данного рельефа встречаются довольно редко, так как скрыты под преимущественно глинисто-алевритовыми и глинистыми отложениями [27]. Температура морской воды на поверхности в среднем

составляла 1,72 °С, минимальные значения были зафиксированы на станции 76 с отметкой в 0,57 °С, максимальные – 3,1 °С (станция 95). Климат акватории резко континентальный с длительной зимой (средняя температура минус 32–33 °С) и непродолжительным летом (средняя температура июня–августа плюс 6–10 °С, по данным метеостанций п. Илирней). Максимальное количество дождей приходится на летний период и составляет 30–40 мм в месяц.

Фактический материал

В рамках данного исследования задачей было проследить, как изменяется состав и свойства ОВ в осадках по мере удаления от прибрежной зоны в сторону шельфовых вод. В связи с этим зона отбора проб охватывает

профиль (25 проб, 12 станций) от прибрежной зоны Чаунской губы (глубина 9 м; станция 76) до внутреннего шельфа ВСМ (глубина 28,2 м; станция 99) (рис. 1). Осадки были отобраны в ходе комплексной научно-исследовательской морской экспедиции на борту НИС «Академик Опарин» в сентябре–октябре 2020 г. Пробы отбирались с помощью бокс-корера. Образцы извлекались поэтапно преимущественно с трех горизонтов: верхний окисленный (0–2 см), промежуточный смешанный (2–5 см) и нижележащий восстановленный (5–10 см). В дальнейшем осадки были помещены в пластиковые пакеты и хранились в морозильном ларе при температуре –18 °С. Перед лабораторными анализами пробы были предварительно лиофилизированы.

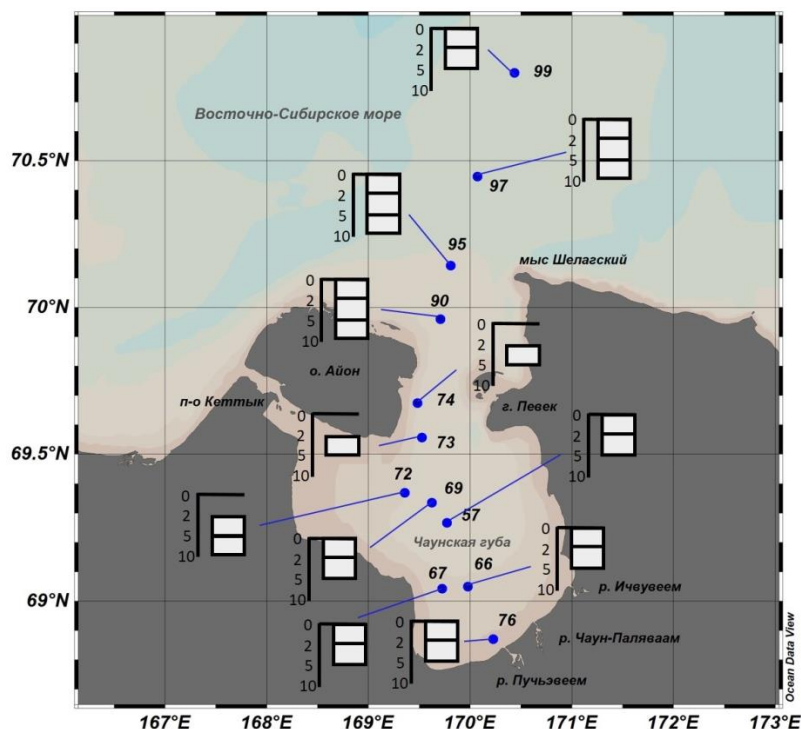


Рис. 1. Карта станций отбора проб. Белые колонки соответствуют горизонтам отбора проб, цифры – глубине отбора (см)

Fig. 1. Sampling stations. The white columns correspond to the sampling horizons, the numbers correspond to the sampling depth (cm)

Методы исследования

Пиролитический анализ

Для анализа групп углеводородных соединений (УВ) донных осадков был применен пиролитический анализ по методу Rock-Eval, обеспечивающий оценку лабильной составляющей ОВ методом разделения на УВ фракции в пиролитических и окислительных условиях [28]. Ранее проведенные исследования морских донных осадков [28–31] показали, что пиролитиз позволяет оценить относительный вклад автохтонного и аллохтонного ОВ, а также степень дигенетического преобразования ОВ [28]. Работы выполнялись на приборе Rock-Eval 6 Turbo компании Vinci Technologies (Франция) согласно стандартным протоколам [32] с использованием специального аналитического режима «Reservoir», адаптированного для незрелого ОВ.

На первой стадии пиролиза навеска сухой породы массой 30–40 мг сжигалась при начальной температуре 180 °С со средней скоростью нагрева 25 °С/мин и выдерживалась в течение 10 минут в бескислородных условиях с формированием пика легких углеводородов (пик S1, мг УВ/г). Далее образец нагревали до 650 °С с получением пика более тяжелых углеводородных соединений (S2, мг УВ/г). Температура, соответствующая максимальной скорости выделения УВ при формировании пика S2, обозначена как Треак (°С). Количества CO и CO₂, представляющие пики S3 CO (мг CO/г) и S3 (мг CO₂/г), соответственно, непрерывно измерялись инфракрасным детектором на второй стадии пиролиза. Затем образец сжигали в окислительной камере, нагретой до 850 °С со скоростью нагрева 20 °С/мин. Эта дополнительная стадия позволила определить значения оста-

точного ОУ (RC, мас. %) и неорганического углерода (MinC, мас. %). Общее содержание ОУ (Сорг или TOC – Total Organic Carbon, мас. %) рассчитывали как сумму пиролизируемой (PC – pyrolysis carbon) и остаточной долей углерода (RC – residual carbon). Водородный (HI – hydrogen index) и кислородный (OI – oxygen index) индексы определяются из соотношений S2/TOC и S3/TOC, соответственно.

Хромато-масс-спектрометрический анализ

Гомогенизированные осадки экстрагировали трихлорметаном особой чистоты с помощью аппарата Сокслета в течение 24 ч. Для связывания элементарной серы в процессе экстракции добавлялась активированная медь. Полученные экстракты концентрировали до 2 мл с помощью ротационного испарителя. Дополнительно для удаления воды добавляли безводный сульфат натрия. Для контроля качества пробоподготовки была проведена серия холостых экспериментов.

Экстракты анализировали методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на приборе Agilent 7890B (ГХ) – Agilent 179 Q-TOF 7200 (МС) с использованием кварцевой капиллярной колонки HP-1MS (длина 30 м, внутренний диаметр 0,25 мм и толщина пленки 0,25 мкм) с вторичной ионизацией в коллизионной ячейке и азотом в качестве коллизионного газа при энергии столкновения 10 эВ. Скорость газа-носителя (гелия) составляла 1,1 мл/мин. Измерения проводились

как в сканирующем (диапазон m/z 50–500), так и в выбранный режим ионного мониторинга (SIM) при 70 эВ. Идентификация компонентов проводилась с использованием библиотеки NIST 14 и с детальным изучением масс-спектров фрагментных и молекулярных ионов.

В данном исследовании мы приводим только данные для n-алканов. Количественное определение и извлечение соединений контролировались с помощью коммерчески доступных внутренних стандартов (D50-тетракозан).

Гранулометрический анализ

Гранулометрический анализ выполнялся на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 NanoTec (Fritsch, Германия). Для создания дисперсионной среды в воду добавляли поверхностно-активное вещество ПАВ-901 (Fritsch, Германия). Калибровка анализатора размера частиц осуществлялась с использованием сертифицированного стандарта F-500 (Fritsch, Германия). Размерная типизация осадков проводилась на основе трехкомпонентной классификации «песок–алеврит–глина», основанной на работе Ф. Шепарда, где осадки с размером частиц >63 мкм – песок, с размером частиц в диапазоне 10–63 мкм – алеврит, в диапазоне 2–10 мкм – пелитовый алеврит и <2 мкм – пелит [33]. В программе Graduate Statistic [34] были рассчитаны: средний размер зерна (M_z), медианный размер зерна (M_d), стандартное отклонение (σ), асимметрия (S_k) и эксцесс (K_g).

Таблица 1. Гранулометрическая характеристика донных осадков Чаунской губы (Восточно-Сибирское море)

Table 1. Grain size characteristics of bottom sediments of the Chaunskaya Bay (East Siberian Sea)

Станция Station	Горизонт отбора Sampling horizon, cm/cm	Долгота Longitude, °E	Широта Latitude, °N	Глубина, м Depth, m	Размерная типизация Grain size classes, %				Статистические параметры Grain size statistical parameters				
					Пелит Clay <2	Пелитовый алеврит Fine silt 2–10	Алеврит Coarse silt 10–63	Песок Sand >63	M_d (D_{50}) мкм μm^a	M_z , мкм μm^b	S_k^c	K_g^d	σ^e
					мкм/ μm								
76	0–2	170,23	68,87	9,0	0,78	1,98	7,61	89,61	325,5	248,7	–2,078	8,911	3,072
	2–5			9,0	9,49	31,39	57,51	1,61	15,05	12,02	–0,799	3,228	3,143
66	0–2	169,98	69,05	14,1	6,80	23,31	62,48	7,40	21,71	17,15	–0,914	3,585	3,22
	2–5			14,1	10,30	34,12	54,56	1,03	13,56	10,97	–0,739	3,112	3,13
67	0–2	169,73	69,04	13,7	6,94	20,98	50,97	21,11	29,44	22,1	–0,782	3,097	3,827
	2–5			13,7	7,26	21,99	57,39	13,36	25,45	19,15	–0,856	3,254	3,542
57	0–2	169,77	69,27	16,0	15,92	46,49	37,41	0,17	7,86	7,085	–0,406	2,713	3,09
	2–5			16,0	15,70	47,24	37,06	0,00	7,934	6,962	–0,486	2,767	2,996
69	0–2	169,46	69,08	10,0	11,25	38,62	49,79	0,33	11,55	9,54	–0,701	3,088	3,041
	2–5			10,0	5,59	15,48	56,91	22,03	36,9	26,4	–1,161	4,021	3,467
72	2–5	169,36	69,37	9,6	4,60	13,47	56,10	25,83	41,05	30,0	–1,253	4,398	3,323
	5–10			9,6	6,81	18,40	54,85	19,94	33,4	23,22	–0,995	3,417	3,67
73	2–5	169,52	69,56	11,3	4,71	15,33	33,72	46,24	59,02	41,61	–0,812	3,028	4,449
74	2–5	169,48	69,68	11,3	5,78	17,80	58,96	17,46	31,72	23,36	–1,06	3,825	3,417
90	0–2	169,71	69,96	13,7	15,74	43,61	40,21	0,43	8,481	7,578	–0,40	2,626	3,219
	2–5			13,7	17,20	49,57	33,23	0,00	7,212	6,314	–0,47	2,655	2,911
	5–10			13,7	14,48	40,83	44,25	0,45	9,718	8,31	–0,479	2,617	3,204
95	0–2	169,81	70,14	19,3	19,78	49,00	31,15	0,07	6,298	5,932	–0,262	2,539	3,099
	2–10			19,3	12,34	41,55	45,55	0,56	10,25	8,845	–0,549	2,913	3,101
	5–10			19,3	18,35	47,41	34,09	0,15	6,995	6,406	–0,336	2,601	3,14
97	0–2	170,07	70,45	27,5	13,32	53,31	33,37	0,00	7,642	6,793	–0,516	2,852	2,647
	2–5			27,5	14,34	46,51	39,10	0,05	8,448	7,414	–0,499	2,819	2,968
	5–10			27,5	14,16	42,36	43,11	0,36	9,401	8,145	–0,485	2,714	1,654
99	0–2	170,43	70,80	28,2	14,17	60,90	24,92	0,01	6,556	5,837	–0,661	3,393	2,505
	2–5			28,2	12,53	43,99	43,33	0,14	5,588	8,273	–0,58	2,983	2,979

^a M_d (D_{50}) – медианный размер зерна; ^b M_z – средний размер зерна; ^c S_k – асимметрия; ^d K_g – эксцесс; ^e σ – сортировка.

^a M_d (D_{50}) – median grain size; ^b M_z – average grain size; ^c S_k – skewness; ^d K_g – kurtosis; ^e σ – sorting coefficient.

Результаты и обсуждение

Гранулометрический состав донных осадков как индикатор условий их формирования

В табл. 1 приведены результаты гранулометрического анализа донных осадков Чаунской губы и части внутреннего шельфа ВСМ. В целом отложения вдоль исследуемого профиля преимущественно состояли из пелитового алевроита ($43,5 \pm 15,39$ %) и алевроита ($34,63 \pm 12,85$ %) с небольшим содержанием пелита ($11,13 \pm 5,00$ %) и песка ($10,73 \pm 20,23$ %).

На рис. 2 приведены графики изменения гранулометрического состава для трех горизонтов отбора проб вдоль исследуемого профиля. На некоторых станциях для осадков различных горизонтов наблюдается большой разброс значений. Так, в поверхностном слое осадков в юго-восточном районе Чаунской губы (станция 76) содержание песка $89,61$ %, при этом в промежуточном слое доля песка уменьшается до $1,61$ % (рис. 2). Такое распределение можно связать с резким изменением условий седиментации с аккумулятивных до эрозионных или с локальным поступлением крупнозернистого материала с речным стоком. Станция 76 находится в зоне приустьевых выходов небольших рек

Чаун-Паляваам, Пучъзеем, суммарный годовой сток которых составляет около половины от общего стока всех рек, впадающих в Чаунскую губу. Основная часть крупнозернистого осадочного материала, поступающего с водами этих рек, осаждалась преимущественно в Чаунской губе, не проникая в воды ВСМ. Осадки в районе между островами Большой Роутан и Айон (горизонт 2–5 см станций 73, 74 и горизонты 2–5, 5–10 для станции 72) характеризуются повышенным содержанием песка, источником которого может быть размыв терригенного материала со стороны о. Айон. Согласно работе [27], высокое содержание песчаного материала между Чаунской губой и к югу от восточного берега о. Айон обусловлено наличием древних береговых комплексов в виде галечно-песчаных кос, баров высотой 4–5 м и шириной до 2–3 км. Дударев и др. [35, 36] отмечают развитие ареалов псаммитов в зонах волнового шлихования на подводном береговом склоне Чаунской губы к югу от восточного берега о. Айон. Высокое содержание песчаного материала в приустьевых участках и на мелководье у островов Чаунской губы отмечается также в работах С.Ю. Гагаева [20, 25].

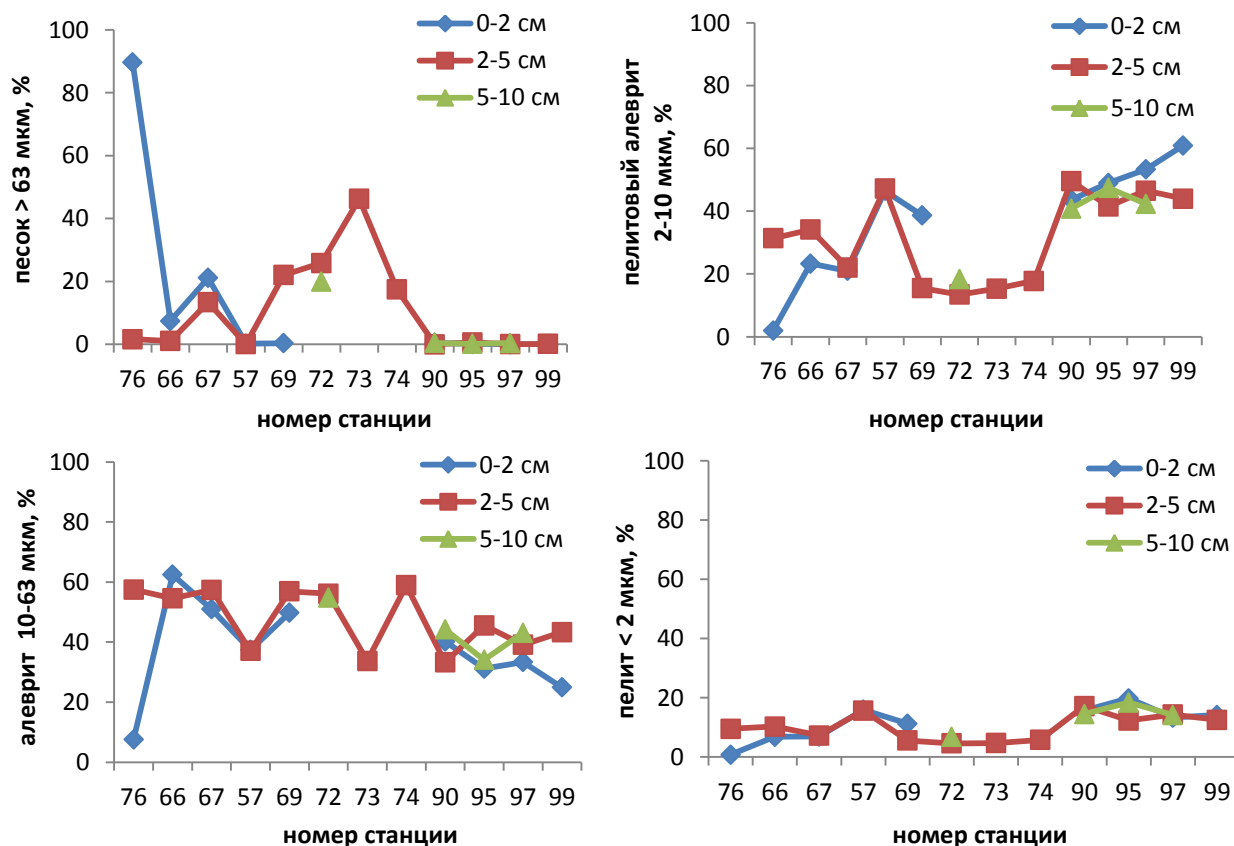


Рис. 2. Распределение гранулометрического состава донных осадков для трех горизонтов отбора вдоль исследуемого профиля. Синим, красным и зеленым обозначены горизонты отбора проб в см

Fig. 2. Grain size characteristics of bottom sediments for three sampling horizons along the studied transect. Blue, red and green indicate sampling horizons in cm

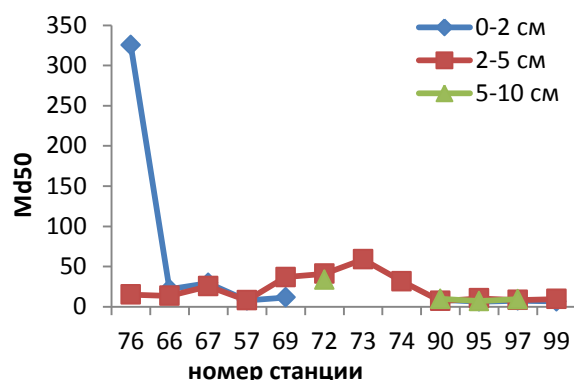


Рис. 3. Распределение медианного размера зерен (Md) осадочного материала вдоль исследуемого профиля

Fig. 3. Distribution of the median grain size (Md) along the studied transect

Средний размер частиц (Mz), а также медианный размер зерна ($Md50$) характеризуют гидродинамический уровень седиментационной среды. Увеличение этих параметров функционально обусловлено повышенными значениями критерия перемещения осадочного материала. Для нашего профиля исследования Mz составил от 5,84 до 41,61 мкм при среднем 13,7 мкм. $Md50$ для исследуемого профиля варьировался от 6,3 до 59,02 мкм при среднем значении в 17,7 мкм (рис. 3). Мы исключили значения Mz (248,7 мкм) и $Md50$ (325,5 мкм) для образца 76 станции поверхностного горизонта, которые могли привести к неправильному определению среднего показателя. Данные высокие значения подтверждают гидродинамическое воздействие речного стока и перенос частиц в исследуемый нами седиментационный бассейн. Также мы наблюдаем относительное повышение значений Mz и $Md50$ для станций 74, 73, а также

для двух горизонтов станции 72, что подтверждает наш вывод сносе терригенного материала со стороны о. Айон.

Оценка зависимости среднего размера зерна M от 1 % наиболее крупных частиц (или 1 % квантиль C) осадков была впервые предложена в работе [37, 38] для наблюдения за способом переноса речных наносов и адаптирована для анализа турбидитов [39]. Мы применили этот способ для оценки механизмов транспорта частиц в рыхлых современных осадках. График C - M позволяет проиллюстрировать максимальную подъемную мощность потока и, соответственно, механизм переноса частиц. На диаграмме Пассеги выделяют следующие поля: пелагическая суспензия (осадки «спокойной воды») T , мутьевые потоки, однородная суспензия S - R , градиционная суспензия R - Q , донная суспензия и качение Q - P . В зоне, заштрихованной серым цветом, расположены отложения мутьевых потоков с преобладанием ила, которые градуируются по размеру зерен [40]. Из графика C - M (рис. 4) видно, что образцы станций 66, 67, 69, 72, 73, 74, 76 попадают в разные поля зоны качения. Это дает основания полагать, что осадочный материал на этих станциях был привнесен с гравитационными потоками термоабразионных отложений, далее осаждался и перераспределялся под действием мутных течений и волновой сепарации на подводном береговом склоне Чаунской губы. Образец со станции 76 поверхностного горизонта (район приустьевых выходов рек) попал в зону Q - P , что может указывать на активное перекачивание частиц в результате переноса речного аллювия на подводный склон Чаунской губы. Основная часть осадков, приуроченных к зоне внутреннего шельфа ВСМ, попадает в зону T , что свидетельствует об относительно спокойных условиях осадконакопления.

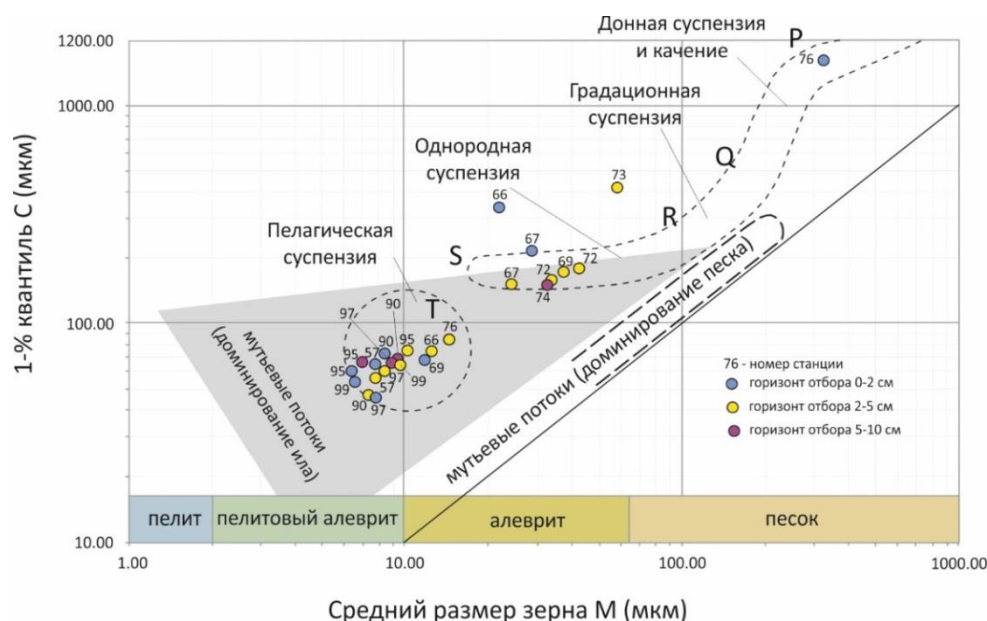


Рис. 4. График зависимости среднего размера зерна M от 1-% квантиля C , показывающий режимы осаждения, связанные с переносом осадочного материала (на основе работ [39, 40])

Fig. 4. CM plot of the grain size data. Modified after [39, 40]

Таким образом, по данным гранулометрического анализа, состав осадочного материала в Чаунской губе преимущественно контролируется гравитационными потоками поступающего терригенного материала – продуктов локальной термоабразии береговой зоны (о. Айон) и речного аллювия – в юго-восточной части губы. Так как район исследования большую часть года покрыт льдом, можно предположить, что определенную роль в формировании седиментационного облика губы играют процессы вытаивания криозоля в результате дрейфа и разрушения полей припайного льда. Эти процессы приурочены к участкам волнового и криогенного выветривания абразионно-денудационных берегов, которые также распространены на территории исследования [11]. Формирование зон распространения пелитового материала обусловлено гравитационным осаждением глинистых частиц вне зон развития волновых процессов в стабильных подледных условиях, в частности, в центральной части Чаунской губы и на внутреннем шельфе ВСМ.

Характеристика состава и источников органического вещества по данным пиролиза Rock-Eval

В табл. 2 приведены результаты пиролитического анализа донных осадков Чаунской губы и части внутреннего шельфа ВСМ. Содержание $C_{орг}$ для исследуемых осадков в целом невысокое и варьируется в пределах от 0,49 до 1,76 %. Для горизонта 0–2 см среднее содержание $C_{орг}$ составляет $1,19 \pm 0,41$ %, для горизонта 2–5 см – $0,99 \pm 0,31$ %, для горизонта 5–10 см – $0,90 \pm 0,15$ %. Значения $C_{орг}$ сопоставимы с ранее опубликованными данными [4, 31, 41, 42]. Станции, где отмечаются наиболее высокие концентрации $C_{орг}$, располагаются на глубоководных участках небольших подводных склонов как в самой Чаунской губе (станции 57, 73), так и за ее пределами (станция 97). Тем не менее необходимо отметить, что полученные концентрации $C_{орг}$ значительно ниже значений, характерных для осадков губы Буор-Хая [31], где содержание $C_{орг}$ достигает 2,7 %.

Пиролиз Rock-Eval дает дополнительную информацию о составе, источниках и степени преобразо-

ванности как зрелого, так и современного ОВ. Высокие значения $S1$ и $S2$ связывают с автохтонным ОВ, в котором отсутствует лигнин, содержится меньше целлюлозы, а также значительно выше доля алифатических соединений [28]. Для исследованных образцов количество свободных низкомолекулярных углеводов ($S1$) в среднем составляет $0,45 \pm 0,15$ мг/г. Среднее содержание летучих продуктов термической деградации ОВ, формирующих пик $S2$, составляет $1,68 \pm 0,63$ мг/г. Содержание геополимеров, т. е. остаточных кислородсодержащих органических соединений ($S3$), составляет $1,95 \pm 0,79$ мг/г. Отмечается невысокое содержание пиролизуемого углерода (PC) в осадках (до 0,44 %), при этом доля остаточного углерода (RC) значительно выше и составляет до 1,32 %. Такое распределение указывает на преобладание терригенного типа ОВ, а также может свидетельствовать о высокой степени преобразованности ОВ в осадках [43, 44].

Индекс диагенетической зрелости, предложенный в работе [45], равный отношению количества УВ, выделившихся до 380°C , к общему количеству выделившихся при пиролизе УВ, составил от 0,16 до 0,27, что также указывает на большую степень диагенетической преобразованности ОВ донных осадков. Иными словами, на долю легких липидных компонентов ($S1$) приходится порядка 20 % от всего объема осадочного ОВ, при этом около 80 % приходится на более устойчивые биогеополимеры. Такие пропорции указывают на активные процессы разложения липидов в процессе седиментации и их перехода в группу биогеополимеров.

Процессы окисления ОВ, характеризующиеся снижением содержания водорода и увеличением содержания кислорода, находят отражение в значениях HI и OI (рис. 5) [28]. Значения HI меняются в пределах от 111 до 188 УВ/г $C_{орг}$ (в среднем 155 ± 24 мг УВ/г $C_{орг}$; из выборки исключен образец 76 (2–5 см) с экстремально высоким значением $HI=232$ мг УВ/г $C_{орг}$). Значения OI находятся в пределах от 134 до 238 мг CO_2 /г $C_{орг}$ (в среднем 182 ± 27 мг CO_2 /г $C_{орг}$).

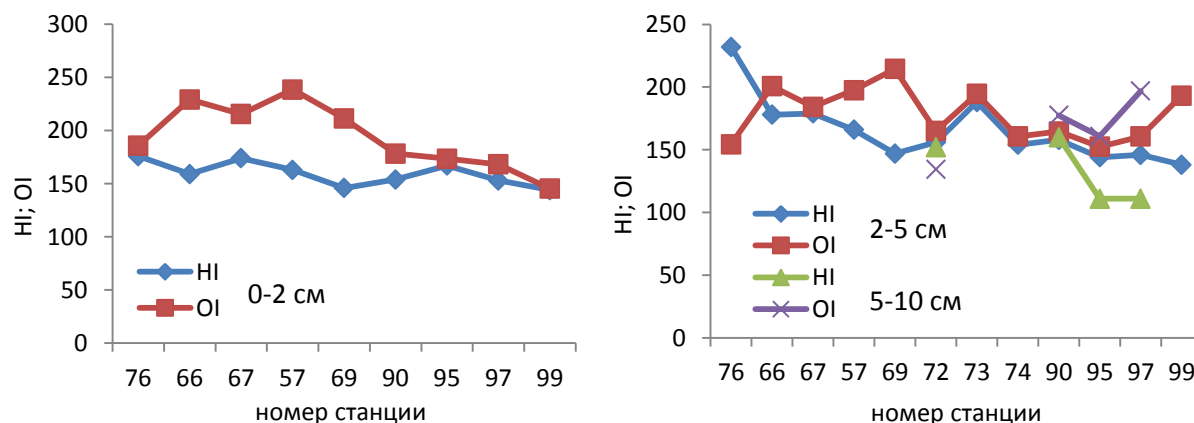


Рис. 5. Распределение значений водородного (HI , мг УВ/г $C_{орг}$) и кислородного (OI , мг CO_2 /г $C_{орг}$) индексов для трех горизонтов отбора проб вдоль исследуемого профиля

Fig. 5. Hydrogen (HI , mg HC/g TOC) and oxygen (OI , mg CO_2 /g TOC) indices for three sampling horizons along the studied profile

Таблица 2. Результаты пиролитического анализа донных осадков Чаунской губы и части внутреннего шельфа Восточно-Сибирского моря

Table 2. Parameters of pyrolytic analysis by the Rock-Eval method of bottom sediments of the Chaunskaya Bay and part of the inner shelf of the East Siberian Sea

Станция Station	Горизонт отбора, см Sampling horizon, cm	Глубина, м Depth, m	T _{peak} , °C ^a	S ₁ ^b , мгУВ/г mgHC/g	S ₂ ^b , мгУВ/г mgHC/g	S ₃ ^b , MgCO ₂ /г MgCO ₂ /g	PC ^c , %	RC ^c , %	TOC ^c , %	HI ^d	OI ^d	MinC ^e , %
76	0–2	9,0	456	0,23	0,86	0,91	0,12	0,37	0,49	176	186	0,05
	2–5		462	0,62	2,69	1,79	0,35	0,81	1,16	232	154	0,08
66	0–2	14,1	449	0,47	2,11	3,05	0,32	1,01	1,33	159	229	0,15
	2–5		453	0,46	2,4	2,71	0,34	1,01	1,35	178	201	0,11
67	0–2	13,7	448	0,75	2,24	2,78	0,35	0,94	1,29	174	216	0,13
	2–5		455	0,42	1,36	1,4	0,2	0,56	0,76	179	184	0,1
57	0–2	16,0	451	0,62	2,87	4,2	0,44	1,32	1,76	163	239	0,17
	2–5		453	0,73	2,67	3,18	0,41	1,2	1,61	166	198	0,16
69	0–2	10,0	449	0,37	1,15	1,67	0,19	0,6	0,79	146	211	0,11
	2–5		453	0,24	0,91	1,33	0,14	0,48	0,62	147	215	0,07
72	2–5	9,6	451	0,25	0,89	0,94	0,13	0,44	0,57	156	165	0,07
	5–10		454	0,27	0,88	0,78	0,13	0,45	0,58	152	134	0,07
73	2–5	11,3	451	0,51	1,71	1,77	0,25	0,66	0,91	188	195	0,09
74	2–5		454	0,29	1,09	1,14	0,16	0,55	0,71	154	161	0,08
90	0–2	13,7	449	0,33	1,63	1,89	0,24	0,82	1,06	154	178	0,11
	2–5		446	0,61	1,96	2,04	0,29	0,95	1,24	158	165	0,14
	5–10		454	0,55	1,98	2,2	0,29	0,95	1,24	160	177	0,11
95	0–2	19,3	457	0,51	2,27	2,36	0,33	1,03	1,36	167	174	0,12
	2–5		453	0,28	1,45	1,54	0,21	0,8	1,01	144	152	0,1
	5–10		449	0,43	1,3	1,88	0,22	0,95	1,17	111	161	0,1
97	0–2	27,5	451	0,65	2,26	2,49	0,34	1,14	1,48	153	168	0,14
	2–5		448	0,4	1,52	1,67	0,23	0,81	1,04	146	161	0,12
	5–10		441	0,37	1,07	1,89	0,2	0,76	0,96	111	197	0,09
99	0–2	28,2	453	0,48	1,53	1,54	0,23	0,83	1,06	144	145	0,08
	2–5		455	0,46	1,2	1,68	0,2	0,67	0,87	138	193	0,1

^aT_{peak} – температура максимального выхода УВ; ^bS₁ – пик, соответствующий количеству свободных низкомолекулярных углеводородов; ^bS₂ – пик, отвечающий содержанию более лабильных белково-углеродных компонентов ОВ; ^bS₃ – пик, соответствующий остаточной кислородосодержащей органике; ^cPC – пиролизуемый углерод; ^cRC – остаточный углерод; ^cTOC – общее количество углерода (все единицы измерения рассчитаны в мас. %); ^dHI – водородный индекс; ^dOI – кислородный индекс; ^eMinC – минеральный углерод.

^aT_{peak} – temperature of peak S₂ yield; ^bS₁ – carbon peak including free hydrocarbons and low molecular weight OM, mg HC/g; ^bS₂ – carbon peak including hydrogen rich OM, mg HC/g; ^bS₃ – carbon peak including oxygen-containing OM, mg CO₂/g; ^cPC – pyrolyzable carbon; ^cRC – residual carbon; ^cTOC – Total organic carbon (all units are calculated in wt. %); ^dHI – Hydrogen Index; ^dOI – Oxygen Index; ^eMinC – mineral carbon.

Предыдущие исследования донных осадков арктических и субарктических шельфовых морей показали, что значение HI, равное 100 мг УВ/г C_{орг}, может быть использовано как переходное значение для разделения терригенного (<100) и морского (>100) типов ОВ [28, 41]. При этом для ОВ осадков моря Лаптевых было определено более высокое переходное значение HI (130 мг УВ/г C_{орг}) [31], предположительно, связанное с биолabileм характером ОВ, ремобилизованного из мерзлотных толщ. Как было показано ранее, такой тип ОВ составляет до 76 % от общего содержания ОВ в осадках шельфа МВА [5]. Тем не менее данная гипотеза вряд ли объясняет повышенные значения HI, характерные для исследуемого района, так как в Чаунской губе отсутствует мощный речной сток и значительно менее распространены зоны активной береговой эрозии – основные источники терригенного ОВ для моря Лаптевых [14]. Вероятнее всего, повышение значений HI связано с высокой первичной продуктивностью самой Чаунской губы [25], воды которой обогащены биогенными элементами [14]. Как было отмечено ранее, процессы переработки и

деструкции ОВ касаются, в первую очередь, лабильных компонентов и сопровождаются увеличением доли кислородосодержащих соединений. Одним из индикаторов таких преобразований может служить соотношение HI/OI. Согласно [28], значения HI/OI < 1 указывают на высокую степень деградации ОВ и/или значительный вклад терригенного ОВ, тогда как для свежеиссинтезированного ОВ значения HI/OI > 2 [44, 46]. Для исследуемых донных осадков отношение HI/OI составило в среднем 0,8±0,2, что подтверждает вышеприведенные выводы.

Температура максимального выхода УВ (T_{peak}), характеризующая термическую стабильность ОВ, может служить дополнительным индикатором предполагаемого источника ОВ [47]. T_{peak} показывает только температуру выхода S₂ и, как правило, состоит из бимодального пика, представленного различными компонентами ОВ [48]. Для исследованных образцов среднее значение T_{peak} составило 452±4 °С, что, предположительно, свидетельствует о высоком содержании гуминовых веществ в осадках [29, 47, 49–51]. Морские гуминовые кислоты распространены среди

арктических морских водорослей и, следовательно, повсеместно присутствуют в осадках арктических шельфовых морей [52]. Гуминовые вещества также составляют значительную долю наземного ОВ [53].

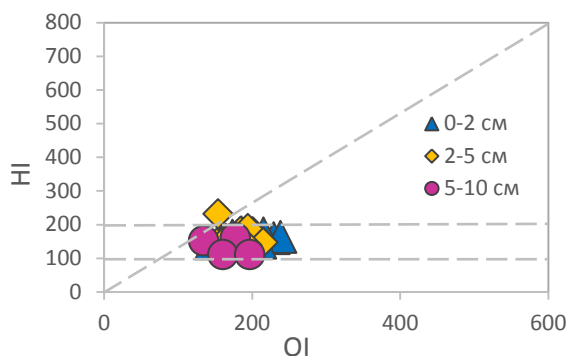


Рис. 6. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена для поверхностных осадков. Треугольник, ромб и круг соответствуют горизонтам отбора проб 0–2, 2–5 и 5–10 см

Fig. 6. Modified Van Krevelen diagram for surface sediments. Triangle, rhombus and circle correspond to the 0–2, 2–5 and 5–10 cm sampling horizons, respectively

Для уточнения источника ОВ мы также применили модифицированную диаграмму типа Ван Кревелена (рис. 6), где ОI и НI отображаются на осях аналогично атомным отношениям О/С и Н/С [47, 54]. Значения НI и ОI попадают в ограниченную область, указывающую на смешение планктоногенного (II) и гумусового (III) типов ОВ со значительным преобладанием первого. ОВ планктоногенного типа отлагается в преимущественно восстановительной обстановке, в осадках, обогащенных детритом фитопланктона, разлагаемого бактериями, тогда как гумусовый тип характерен для ОВ, которое образуется из уже разложившихся остатков высших наземных растений в субаэральных условиях.

Для пелитовых осадков, как правило, характерно более высокое содержание ОВ, чем для крупнозернистых осадков [55]. Крупнозернистые осадки преимущественно ассоциированы с растительным детритом, большая часть которого осаждается в прибрежной зоне шельфа [56, 57]. В исследуемых образцах отмечается положительная корреляция содержания C_{org} и доли пелитового материала в осадках ($R^2=0,43$; рис. 7, а). Данная зависимость косвенно подтверждает роль минеральной матрицы [58–60] в накоплении и сохранении ОВ. При этом для значений НI ($R^2=0,15$) и ОI ($R^2=0,08$) подобной корреляции не наблюдалось (рис. 7, б).

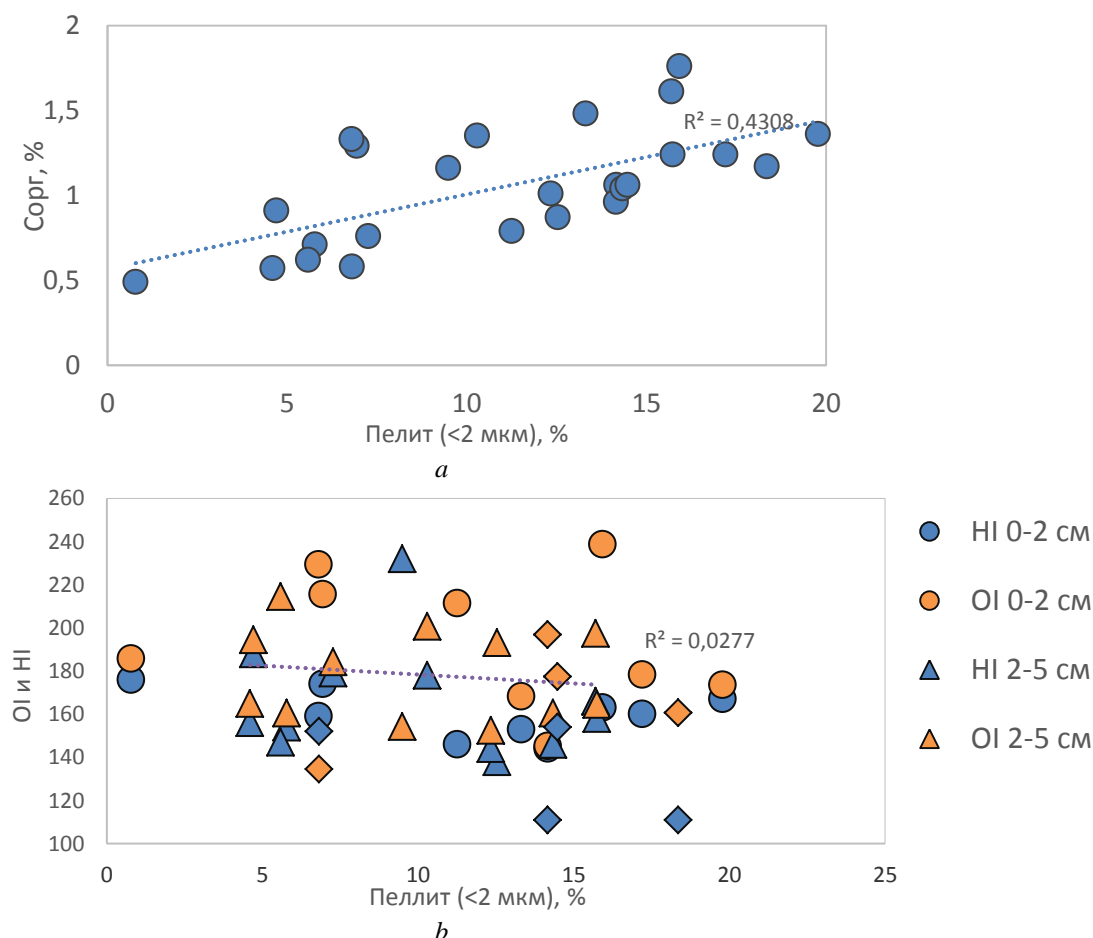


Рис. 7. Зависимость ТОС, % (а) кислородного (ОI, мг CO_2 /г C_{org}) и водородного (НI, мг $УВ$ /г C_{org}) индексов (б); от содержания пелитовой фракции для донных осадков

Fig. 7. Correlation between oxygen (ОI, mg CO_2 /g TOC) and hydrogen (НI, mg HC /g TOC) indices (а); TOC , % (б) and the clay fraction

Таким образом, анализ основных пиролитических характеристик указывает на значительную степень преобразования ОБ донных осадков и, предположительно, высокое содержание трудноразлагаемых гуминовых веществ и фульвокислот. Тем не менее в общей структуре состава ОБ прослеживается значительная доля автохтонного материала, что отражает высокую локальную биопродуктивность вод Чаунской губы.

Распределение *n*-алканов как индикатор источника органического вещества и степени его преобразования

Для исследуемых осадков с помощью ГХ-МС анализа были получены данные по распределению *n*-алканов – предельных углеводородов открытого линейного строения (табл. 3). Распределение *n*-алканов

зависит от множества факторов, основными из которых являются: тип исходного ОБ, изменение состава ОБ при транспорте, накоплении и преобразовании. Известно, что высокомолекулярные гомологи нечетных *n*-алканов ($\geq C_{21}$), содержащиеся в восковом покрытии высших наземных растений, свидетельствует о терригенном происхождении ОБ, в то время как низкомолекулярные гомологи ($\leq C_{19}$) указывают на гидробионтную и планктоногенную компоненту ОБ [61, 62]. В исследуемых образцах были обнаружены *n*-алканы в диапазоне от *n*-C₁₄ до *n*-C₃₅. Наиболее распространенными гомологами были *n*-C₂₅, *n*-C₂₇, *n*-C₂₉, *n*-C₃₁, что указывает на преобладание ОБ терригенного происхождения (рис. 8).

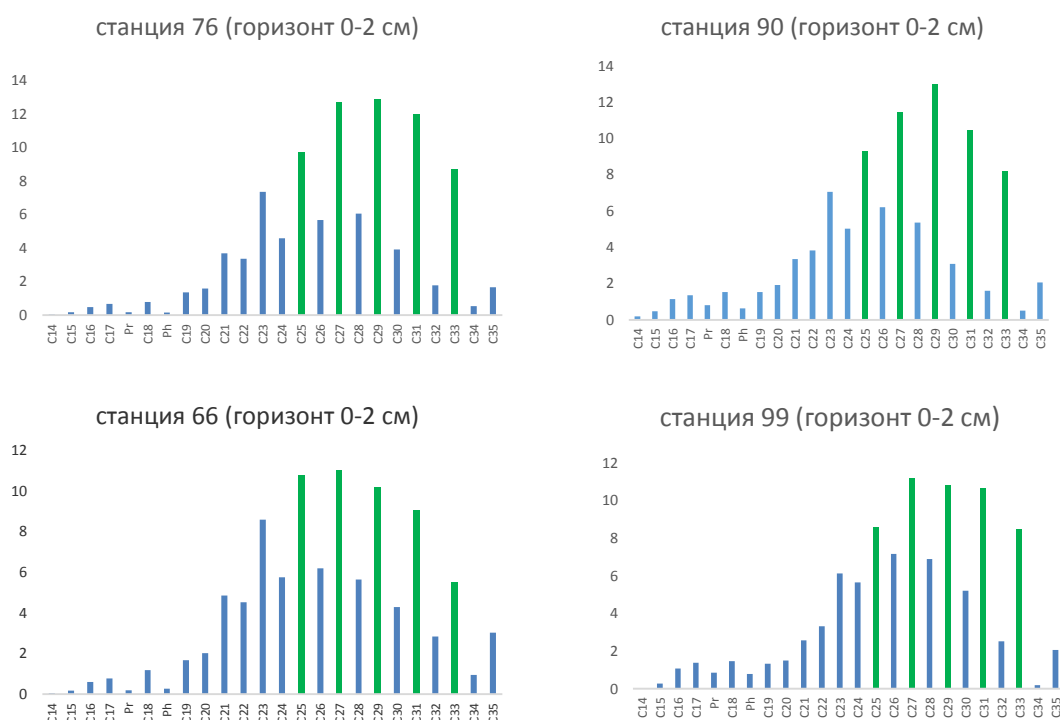


Рис. 8. Примеры распределения *n*-алканов органического вещества донных осадков

Fig. 8. Distribution of *n*-alkanes of organic carbon in the bottom sediments

Мы рассчитали ряд молекулярных индексов, ранее используемых для оценки состава и источников ОБ в осадках арктических морей [63, 64]. Так, индекс нечетности CPI (Carbon Preference Index) показывает степень преобразования *n*-алканов с нечетным числом атомов углерода над гомологами с четным числом и рассматривается как маркер степени диagenетической преобразованности ОБ [65]. Значения CPI_{25–33} выше 5 относятся к более свежему ОБ, тогда как в процессе окисления и разложения ОБ значения CPI снижаются до 1. В исследованных осадках CPI меняется в диапазоне от 1,47 до 4. Отметим, что с увеличением глубины станции отбора значения CPI увеличиваются, указывая на усиление вклада свежесинтезированного ОБ.

Отношение высокомолекулярных *n*-алканов (HMW – high molecular weight) к низкомолекулярным

(LMW – low molecular weight) *n*-алканам варьируется в диапазоне 8,02–49,26, отражая высокое содержание наземного ОБ. Тем не менее полученные значения существенно ниже показателей для осадков губы Буор-Хая, где индекс HMW/LMW *n*-алканов достигал 130.

Основной индекс, характеризующий диagenетическую преобразованность ОБ (Ki), вдоль всего исследуемого профиля составил от 0,23 (станция 76, горизонт 2–5 см) до 0,58 (станции 95, 97, 99) со средним значением 0,41. Известно, что коэффициент (Ki) повышается в процессе преобразования ОБ и для изученных образцов он отрицательно соотносится с индексом CPI ($R^2 = -0,4$).

Коэффициент TAR (Terrigenous to Aquatic Ratio), который характеризует соотношение вклада терригенного типа к морскому типу ОБ, варьируется от 2,7 до 19,88. Экстремально высокое значение TAR (33,9) бы-

ло зафиксировано для станции 90 (горизонт 5–10). Для сравнения, полученные значения значительно (почти на 50 %) ниже значений, характерных для осадков губы Буор-Хая (до 65,2), что также подчеркивает различия в седиментационных и биогеохимических условиях накопления ОВ в двух акваториях [31].

Отношение нечетных *n*-алканов к четным рассчитывается через индекс нечетности ОЕР (Odd Even Predominance) ($C_{26}-C_{33}$). ОЕР может нести информацию о вкладе высших наземных растений в состав ОВ. Для нашего района исследования ОЕР_{26–33} составляет от 1,21 до 3,87, что дополнительно подтверждает значительную роль наземного ОВ в составе ОВ исследуемых осадков. В свою очередь, индексы нечетности ОЕР₁₇ и ОЕР₁₉ указывают на высокую степень преобразованности ОВ.

Среди изопреноидных алканов в качестве биомаркеров используются пристан (Pr) и фитан (Ph) – производные фитола, входящего в состав хлорофилла. Отношение Pr/Ph – геохимический параметр, позволяющий оценить окислительно-восстановительный потенциал обстановки осадконакопления. Для поверхностного горизонта осадков отношение Pr/Ph варьировалось от 0,67 до 1,41 (среднее 1,07); для промежуточного слоя от 0,62 до 1,59 (среднее 1,05); для

нижележащего слоя от 0,6 до 1,21 (среднее 0,93). Полученные значения указывают на преимущественно восстановительную и субокислительную среду, присущую переходной зоне речных-морских и морских условий [62]. При этом корреляция между ОИ и Pr/Ph отсутствует.

Таким образом, распределения *n*-алканов в донных осадках Чаунской губы и прилегающей акватории указывают на смешанный генезис ОВ с доминирующим вкладом наземного диагенетически преобразованного ОВ. Тем не менее сопоставление водородного индекса HI и ряда молекулярных индексов (HMW/LMW *n*-алканы, CPI, TAR, Pr/Ph), полученных для осадков Чаунской губы и ранее для губы Буор-Хая, свидетельствуют о сравнительно менее активном вкладе терригенного материала в структуру ОВ исследуемого района, предполагая наличие постоянного источника автохтонной продукции. Таким источником, предположительно, являются высокопродуктивные воды Чаунской губы, при этом по мере удаления от полужамкнутой акватории автохтонная компонента на шельфе ВСМ может также контролироваться притоком тихоокеанских вод, обогащенных биогенными элементами [14].

Таблица 3. Характеристика *n*-алканов в донных осадках Чаунской губы и части внутреннего шельфа Восточно-Сибирского моря

Table 3. *N-alkanes in bottom sediments of the Chaunskaya Bay and part of the East Siberian Sea inner shelf*

Станция Station	Горизонт, см Sampling horizon, cm	Молекулярные соотношения Molecular ratios									
		HMW ^a /LMW ^a <i>n</i> -алк	CPI ^b	Ki ^b	TAR ^b	OEP ^c 17	OEP19	OEP 26-33	Pr ^d /Phy ^d	Pr/ <i>n</i> -C17	Phy/ <i>n</i> -C18
76	0–2	33,47	2,82	0,23	16,93	1,10	1,32	2,65	1,16	0,26	0,19
66	0–2	25,37	2,11	0,24	11,50	0,91	1,22	1,88	0,69	0,24	0,23
	2–5	9,64	1,83	0,36	3,23	0,89	1,14	1,53	0,74	0,37	0,36
67	0–2	10,25	1,47	0,48	2,74	1,09	1,55	1,21	0,67	0,40	0,55
	2–5	37,03	2,82	0,29	19,88	1,24	1,28	2,82	0,79	0,25	0,32
57	0–2	23,24	2,43	0,49	10,55	1,04	1,19	2,31	1,41	0,54	0,43
	2–5	27,83	2,32	0,44	12,51	1,08	1,27	2,19	1,05	0,45	0,43
69	0–2	31,03	2,67	0,34	15,78	1,13	1,26	2,56	1,32	0,38	0,29
	2–5	30,96	2,53	0,31	15,04	1,18	1,27	2,41	1,27	0,35	0,27
72	2–5	27,15	2,87	0,40	17,13	0,56	0,84	2,75	1,05	0,51	0,32
	5–10	27,96	2,42	0,54	16,04	0,76	0,87	2,27	0,86	0,60	0,49
73	2–5	17,68	2,06	0,40	7,96	0,93	1,00	1,94	1,27	0,48	0,33
74	2–5	32,75	2,55	0,48	14,40	1,18	1,29	2,42	1,59	0,51	0,45
90	0–2	20,47	2,80	0,50	10,42	0,94	1,01	2,65	1,29	0,59	0,41
	2–5	29,33	3,64	0,30	14,98	0,96	1,19	3,45	0,62	0,27	0,32
	5–10	49,26	4,00	0,37	33,89	0,86	1,77	3,87	1,06	0,70	0,25
95	2–5	31,96	2,31	0,51	17,42	0,94	0,98	2,18	0,72	0,48	0,54
	5–10	20,70	2,14	0,58	9,92	0,73	1,05	2,05	1,21	0,70	0,47
97	0–2	15,53	1,86	0,58	6,43	0,97	1,00	1,75	0,94	0,48	0,32
	2–5	25,62	2,43	0,32	13,82	0,90	1,25	2,26	0,66	0,31	0,33
	5–10	8,02	1,84	0,37	2,74	0,74	1,02	1,53	0,60	0,40	0,36
99	0–2	21,85	2,04	0,58	11,03	0,97	1,00	1,89	1,09	0,62	0,53
	2–5	21,49	3,17	0,32	12,76	0,68	0,90	3,02	1,54	0,47	0,21

^aHMW (High Molecular Weight) – высокомолекулярные *n*-алканы; ^aLMW (Low Molecular Weight) – низкомолекулярные *n*-алканы; ^bCPI (Carbon Preference Index) – индекс нечетности *n*-алканов; ^bKi – индекс диагенетической зрелости ОВ; ^bTAR (Terrigenous to Aquatic Ratio) – индекс, характеризующий отношение вклада терригенного ОВ к биогенной составляющей ОВ; ^cOEP (Odd Even Predominance) – индекс нечетности; ^dPr – пристан; ^dPh – фитан.

^aHMW (High Molecular Weight) – high molecular weight *n*-alkanes; ^aLMW (Low Molecular Weight) – low molecular weight *n*-alkanes; ^bCPI (Carbon Preference Index) – odd *n*-alkane index; ^bKi – diagenetic maturity index OC; ^bTAR (Terrigenous to Aquatic Ratio) – index characterizing the ratio of the contribution of terrigenous OC to biogenic component OC; ^cOEP (Odd Even Predominance) – odd index; ^dPr – pristan; ^dPh – fitan.

Заключение

Состав осадочного материала в Чаунской губе преимущественно определяется особенностями подводного рельефа (например, зоны волнового шлихования на береговом склоне) и гравитационными потоками поступающего терригенного материала – продуктов локальной термоабразии береговой зоны (о. Айон) и речного аллювия в юго-восточной части губы. Определенную роль в формировании седиментационного облика губы, предположительно, играют процессы вытаивания криозоля в результате разрушения областей припайного льда. Формирование областей пелитовых осадков обусловлено гравитационным осаждением глинистых частиц вне зон развития волновых процессов в стабильных подледных условиях, в частности, в центральной части Чаунской губы и на внутреннем шельфе ВСМ.

Данные пиролиза Rock-Eval, а также анализ распределения *n*-алканов для поверхностных осадков указывают на смешанный генезис ОВ с доминирую-

щим вкладом наземного ОВ высокой степени преобразованности. Тем не менее сопоставление ряда молекулярных индексов (НМВ/ЛМВ *n*-алканы, СРІ, TAR, Pr/Ph), полученных для осадков исследуемого района и губы Буор-Хая, позволило сделать вывод о сравнительно менее активном вкладе терригенного материала в структуру ОВ Чаунской губы по сравнению с западными акваториями Восточно-Сибирского арктического шельфа. Присутствие автохтонной компоненты в ОВ исследуемых осадков отражает высокую первичную продуктивность вод полужамкнутой акватории Чаунской губы.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 21-77-00075 (геохимические и седиментологические исследования), а также при частичной поддержке проекта Российского научного фонда № 21-77-30001 (предварительная обработка проб в ТОИ ДВО РАН). Экспедиция в Чаунскую губу была проведена при поддержке проекта РНФ № 19-17-00058 и госзадания ТОИ ДВО РАН № АААА-А20-120011090005-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Permafrost carbon and CO₂ pathways differ at contrasting coastal erosion sites in the Canadian Arctic / G. Tanski, L. Bröder, D. Wagner, C. Knoblauch, H. Lantuit, C. Beer, T. Sachs, M. Fritz, T. Tesi, B.P. Koch, N. Haghipour, T.I. Eglinton, J. Strauss, J.E. Vonk // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – V. 9. – P. 1–20.
2. Nearshore zone dynamics determine pathway of organic carbon from eroding permafrost coasts / D. Jong, L. Bröder, G. Tanski, M. Fritz, H. Lantuit, T. Tesi, N. Haghipour, T.I. Eglinton, J.E. Vonk // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – V. 47. – P. 1–10.
3. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, I. Leifer, V. Sergienko, A. Salyuk, D. Kosmach, D. Chernykh, C. Stubbs, D. Nicolsky, V. Tumskey, Ö. Gustafsson // *Nature Geoscience*. – 2014. – V. 7. – P. 64–70.
4. Effect of terrestrial organic matter on ocean acidification and CO₂ flux in an Arctic shelf sea / D.W. Capelle, Z.Z.A. Kuzyk, T. Papakyriakou, C. Guéguen, L.A. Miller, R.W. Macdonald // *Progress in Oceanography*. – 2020. – V. 185. – P. 1–14.
5. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia / J.E. Vonk, L. Sanchez-Garcia, B.E. van Dongen, V. Alling, D. Kosmach, A. Charkin, I.P. Semiletov, O.V. Dudarev, N. Shakhova, P. Roos, T.I. Eglinton, A. Andersson, A. Gustafsson // *Nature*. – 2012. – V. 489. – P. 137–140.
6. Rivers across the Siberian Arctic unearth the patterns of carbon release from thawing permafrost / B. Wild, A. Andersson, L. Bröder, J. Vonk, G. Hugelius, J.W. McClelland, W. Song, P.A. Raymond, Ö. Gustafsson // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2019. – V. 116. – P. 10280–10285.
7. Brown N.J., Nilsson J., Pemberton P. Arctic Ocean freshwater dynamics: transient response to increasing river runoff and precipitation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2019. – V. 124. – P. 5205–5219.
8. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂ / M. Kunitski, N. Eicke, P. Huber, J. Köhler, S. Zeller, J. Voigtsberger, N. Schlott, K. Henrichs, H. Sann, F. Trinter, L.P.H. Schmidt, A. Kalinin, M.S. Schöffler, T. Jahnke, M. Lein, R. Dörner // *Nat. Commun.* – 2019. – V. 10. – P. 1–13.
9. Thackeray C.W., Hall A. An emergent constraint on future Arctic sea-ice albedo feedback // *Nature Climate Change*. – 2019. – V. 9. – P. 972–978.
10. Casas-Prat M., Wang X.L. Sea ice retreat contributes to projected increases in extreme Arctic Ocean surface waves // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – V. 47. – P. 1–11.
11. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Carbon cycle in the Russian Arctic Seas. – Moscow: Springer Publ., 2004. – 332 p.
12. Winterfeld M., Laepple T., Mollenhauer G. Characterization of particulate organic matter in the Lena River delta and adjacent nearshore zone, NE Siberia – Part I: Radiocarbon inventories // *Biogeosciences*. – 2015. – V. 12. – P. 3769–3788.
13. Clay minerals as indicators of sources of terrigenous sediments, their transportation and deposition: Bering Basin, Russian-Alaskan Arctic / A.S. Naidu, M.W. Han, T.C. Mowatt, W. Wajda // *Marine Geology*. – 1995. – V. 127. – P. 87–104.
14. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters / I. Semiletov, O. Dudarev, V. Luchin, A. Charkin, K.H. Shin, N. Tanaka // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – V. 32. – P. 1–5.
15. The Arctic is now warming four times as fast as the rest of the globe / P. Jacobs, N.J.L. Lenssen, G.A. Schmidt, R.A. Rohde. – New Orleans: AGU Fall Meeting Publ., 2021. – A13E-02.
16. Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in the bottom sediments of the eastern Arctic shelf / V.I. Petrova, G.I. Batova, A.V. Kursheva, I.V. Litvinenko, V.M. Savinov, T.N. Savinova // *Oceanology*. – 2008. – V. 48. – P. 196–203.
17. Contrasting composition of terrigenous organic matter in the dissolved, particulate and sedimentary organic carbon pools on the outer East Siberian Arctic Shelf / J.A. Salvadó, T. Tesi, M. Sundbom, E. Karlsson, M. Krusá, I.P. Semiletov, E. Panova, Ö. Gustafsson // *Biogeosciences*. – 2016. – V. 13. – P. 6121–6138.
18. Widespread release of old carbon across the Siberian Arctic echoed by its large rivers / Ö. Gustafsson, B.E. van Dongen, J.E. Vonk, O.V. Dudarev, I.P. Semiletov // *Biogeosciences*. – 2011. – V. 8. – P. 1737–1743.
19. Distributions of bacterial and archaeal membrane lipids in surface sediments reflect differences in input and loss of terrestrial organic carbon along a cross-shelf Arctic transect / A. Doğrul Selver, R.B. Sparkes, J. Bischoff, H.M. Talbot, Ö. Gustafsson, I.P. Semiletov, O.V. Dudarev, S. Boulton, B.E. van Dongen // *Organic Geochemistry*. – 2015. – V. 83–84. – P. 16–26.
20. Дударев О.В. Современный литоморфогенез на Восточно-Арктическом шельфе России: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Владивосток, 2016. – 49 с.
21. Патык-Кара Н.Г., Иванова А.М. Геохимические поиски месторождений твердых полезных ископаемых на континентальном шельфе. – М.: Научный мир, 2003. – 415 с.
22. Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения // Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – Т. II. – 468 с.
23. Лучин В.А., Семилетов И.П. Межгодовая изменчивость температуры воды Чукотского моря // ДАН. – 2005. – Т. 405. – № 9. – С. 1419–1422.

24. Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л. Обстановки морфолитоге-
неза в прибрежной зоне Мирового океана / отв. ред. Л.И. Лоб-
ковский. – М.: Наука, 2007. – 455 с.
25. Гагаев С.Ю. Экосистемы, флора и фауна Чаунской губы и со-
предельных вод Восточно-Сибирского моря. Ч. 1. Т. 47/Ч. 2.
Т. 48 // Исследования фауны морей / под ред. О.А. Скарлато. –
СПб: Изд-во ЗИН РАН, 1994. – 152 с.
26. Северо-Восточный комплексный научно исследовательский
институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Рос-
сийской академии наук. URL: <https://neisri.ru/rffi-18-05-60036/2/> (дата обращения 15.09.2022).
27. Валпегер А.П. Характерные формы рельефа прибрежного
шельфа Восточно- Сибирского моря и их значение для палео-
географических реконструкций // Геоморфология и палеогео-
графия шельфа. Материалы XII пленума Геоморфологической
комиссии. – М.: Наука, 1978. – С. 134–139.
28. Characterization of sedimentary organic matter in recent marine
sediments from Hudson Bay, Canada, by Rock-Eval pyrolysis /
A.A. Hare, Z.Z.A. Kuzyk, R.W. Macdonald, H. Sanei, D. Barber,
G.A. Stern, F. Wang // *Organic Geochemistry*. – 2014. – V. 68. –
P. 52–60.
29. Liebezeit G., Wiesner M.G. Pyrolysis of recent marine sediments-I.
Biopolymers // *Organic Geochemistry*. – 1990. – V. 16. –
P. 1179–1185.
30. Marchand C., Lallier-Vergès E., Baltzer F. The composition of
sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a
mangrove-fringed coast in French Guiana // *Estuarine, Coastal and
Shelf Science*. – 2003. – V. 56. – P. 119–130.
31. Composition of sedimentary organic matter across the Laptev Sea
Shelf: evidences from Rock-Eval parameters and molecular indi-
cators / E. Gershelis, A. Grinko, I. Oberemok, E. Klevantseva,
N. Poltavskaya, A. Ruban, D. Chernykh, A. Leonov, N. Guseva,
I. Semiletov // *Water*. – 2020. – V. 12. – P. 1–21.
32. Behar F., Beaumont V., De H.L. Technologie Rock-Eval 6: per-
formances et développements // *Oil and Gas Science and Technol-
ogy*. – 2001. – V. 56. – P. 111–134.
33. Shepard F.P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios // *Journal
of Sedimentary Petrology*. – 1954. – V. 24. – P. 151–158.
34. Folk R.L., Ward W.C. Brazos River bar: a study in the signifi-
cance of grain size parameters // *Sediment. Petrol.* – 1957. –
V. 27. – P. 3–26.
35. О современном состоянии подводных островных реликтов на
Восточно-Сибирском шельфе / О.В. Дударев, А.Н. Чаркин,
И.П. Семилетов, И.Н. Шило, А.Н. Салюк, Э.А. Спивак // До-
клады Академии наук. – 2008. – Т. 419. – № 2. – С. 255–261.
36. Восточно-Сибирский шельф: особенности современного мор-
фолитоге-неза / О.В. Дударев, А.Н. Чаркин, И.П. Семилетов,
Дж. Вонк, О. Густафсон, П. Андерсон // *Геология Морей и
Океанов: Материалы XVIII Международной Научной Конфе-
ренции (Школы) по Морской Геологии*. – М.: Институт океа-
нологии им. Ширшова РАН, 2009. – Т. I. – С. 35–38.
37. McLaren P. An interpretation of trends in grain size measures //
Journal of Sedimentary Research. – 1981. – V. 51. – P. 611–624.
38. Passega R. Texture as characteristic of clastic deposition // *AAPG
Bulletin*. – 1957. – V. 41. – P. 1952–1984.
39. Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geologic
tool // *Journal of Sedimentary Research*. – 1964. – V. 34. –
P. 830–847.
40. Primary deposition and early diagenetic effects on the high satura-
tion accumulation of gas hydrate in a silt dominated reservoir in
the Gulf of Mexico / J.E. Johnson, D.R. MacLeod, S.C. Phillips,
M.P. Phillips, D.L. Divins // *Marine Geology*. – 2022. – V. 444. –
P. 1–22.
41. Stein R., Macdonald R. The organic carbon cycle in the Arctic
Ocean. – Berlin: Springer Publ., 2004. – 314 p.
42. Quantifying degradative loss of terrigenous organic carbon in sur-
face sediments across the Laptev and East Siberian Sea / L. Brö-
der, A. Andersson, T. Tesi, I. Semiletov, O. Gustafsson // *Global
Biogeochemical Cycles*. – 2019. – V. 33. – P. 85–99.
43. Lüniger G., Schwark L. Characterisation of sedimentary organic
matter by bulk and molecular geochemical proxies: an example
from oligocene maar-type Lake Enspel, Germany // *Sedimentary
Geology*. – 2002. – V. 148. – P. 275–288.
44. Organic carbon sources and transformations in mangrove sedi-
ments: a Rock-Eval pyrolysis approach / C. Marchand, E. Lallier-
Vergès, J.R. Disnar, D. Kéravis // *Organic Geochemistry*. –
2008. – V. 39. – P. 408–421.
45. Melenevskii V.N., Leonova G.A., Konyshev A.S. The organic
matter of the recent sediments of Lake Beloe, West Siberia (from
data of pyrolytic studies) // *Russian Geology and Geophysics*. –
2011. – V. 52. – P. 583–592.
46. Carrie J., Sanei H., Stern G. Standardisation of Rock-Eval pyroly-
sis for the analysis of recent sediments and soils // *Organic Geo-
chemistry*. – 2012. – V. 46. – P. 38–53.
47. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyroly-
sis: scope and limitations / J.R. Disnar, B. Guillet, D. Keravis,
C. Di-Giovanni, D. Sebag // *Organic Geochemistry*. – 2003. –
V. 34. – P. 327–343.
48. Quantification methods of black carbon: comparison of Rock-Eval
analysis with traditional methods / A. Poot, J.T.K. Quik, H. Veld,
A.A. Koelmans // *Journal of Chromatography A*. – 2009. –
V. 1216. – P. 613–622.
49. Meyers P.A., Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an
overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in
lake sediments // *Organic Geochemistry*. – 1993. – V. 20. –
P. 867–900.
50. Early diagenesis of carbohydrates and lignin in mangrove sedi-
ments subject to variable redox conditions (French Guiana) /
C. Marchand, J.R. Disnar, E. Lallier-Vergès, N. Lottier // *Geo-
chimica et Cosmochimica Acta*. – 2005. – V. 69. – P. 131–142.
51. Heterogeneous organic matter from the surface horizon of a tem-
perate zone marsh / M. Hetényi, T. Nyilas, C. Sajgó, A. Brukner-
Wein // *Organic Geochemistry*. – 2006. – V. 37. – P. 1931–1942.
52. Perminova I.V., Petrosyan V.S. Marine humic acids in the organic
carbon flux in the Bering and Chukchi Seas ecosystems // *Pro-
ceedings of the Conference on Carbon Cycling in the Boreal For-
ests and Subarctic Ecosystems*. – Corvallis: EPA/MR-126546
OSU Publ., 1991. – P. 37–42.
53. Hayes M.H.B., Mylotte R., Swift R.S. Humins: its composition and
importance in soil organic matter // *Advances in Agronomy*. –
2017. – V. 143. – P. 47–138.
54. Kruege M.A., Mukhopadhyay P.K., Lewis C.F.M. A molecular
evaluation of contaminants and natural organic matter in bottom
sediments from western Lake Ontario // *Organic Geochemistry*. –
1998. – V. 29. – P. 1797–1812.
55. Mayer L.M. Relationships between mineral surfaces and organic
carbon concentrations in soils and sediments // *Chemical Geolo-
gy*. – 1994. – V. 114. – P. 347–363.
56. Partitioning of organic matter in continental margin sediments
among density fractions / S.G. Wakeham, E.A. Canuel, E.J. Ler-
berg, P. Mason, T.P. Sampere, T.S. Bianchi // *Marine Chemistry*. –
2009. – V. 115. – P. 211–225.
57. Matrix association effects on hydrodynamic sorting and degrada-
tion of terrestrial organic matter during cross-shelf transport in the
Laptev and East Siberian shelf seas / T. Tesi, I. Semiletov,
O. Dударев, A. Andersson, Ö. Gustafsson // *Journal of Geophys-
ical Research: Biogeosciences*. – 2016. – V. 121. – P. 731–752.
58. Controls on the abundance, provenance and age of organic carbon
buried in continental margin sediments / B. Ausin, E. Bruni,
N. Haghipour, C. Welte, S.M. Bernasconi, T.I. Eglinton // *Earth
and Planetary Science Letters*. – 2021. – V. 558. – P. 116–759.
59. Adsorption of organic matter on clay minerals in the Dajiuhe peat
soil chronosequence, South China / H. Hong, S. Chen, Q. Fang,
T.J. Algeo, L. Zhao // *Applied Clay Science*. – 2019. – V. 178. –
P. 1–14.
60. Mineralogical control on the fate of continentally derived organic
matter in the ocean / T.M. Blattmann, Z. Liu, Y. Zhang, Y. Zhao,
N. Haghipour, D.B. Montluçon, M. Plötze, T.I. Eglinton // *Science*. –
2019. – V. 366. – P. 742–745.
61. Eglinton G., Hamilton R.J. Leaf epicuticular waxes // *Science*. –
1967. – V. 156. – P. 1322–1335.
62. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence. –
Berlin, Heidelberg: Springer Publ., 1984. – 702 p.
63. Organic carbon in Arctic Ocean sediments: sources, variability,
burial, and paleoenvironmental significance / R. Stein, R.W. Mac-
donald, A.S. Naidu, M.B. Yunker, C. Gobeil, L.W. Cooper,
J.M. Grebmeier, T.E. Whitledge, M.J. Hameedi, V.I. Petrova,
G.I. Batova, A.G. Zinchenko, A.V. Kursheva, E.V. Narkevskiy,
K. Fahl, A. Vetrov, E.A. Romankevich, D. Birgel, C. Schubert,

- H.R. Harvey, D. Weiel // The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. – Berlin, Heidelberg: Springer Publ., 2004. – P. 169–314.
64. Multi-molecular tracers of terrestrial carbon transfer across the pan-Arctic: comparison of hydrolyzable components with plant wax lipids and lignin phenols / X. Feng, O. Gustafsson R.M. Holmes, J.E. Vonk, B.E. van Dongen, I.P. Semiletov, O.V. Dudarev, M.B. Yunker, R.W. MacDonald, D.B. Montluçon, T.I. Eglinton // Biogeosciences. – 2015. – V. 12. – P. 4841–4860.
65. Stevenson M.A., Abbott G.D. Exploring the composition of macromolecular organic matter in Arctic Ocean sediments under a changing sea ice gradient // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2019. – V. 140. – P. 102–111.

Поступила: 05.10.2022 г.

Дата рецензирования: 09.01.2023 г.

Информация об авторах

Полтавская Н.А., аспирант, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гершелис Е.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Оберемок И.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гринько А.А., кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН.

Чаркин А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией перспективных методов морских исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН.

Ярошук Е.И., ведущий инженер лаборатории перспективных методов морских исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН.

Дударев О.В., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН.

Смирнова Н.А., заведующая лабораторией геологии месторождений нефти и газа Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Гусева Н.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель директора по научно-образовательной деятельности Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Семилетов И.П., член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.35

COMPOSITION OF ORGANIC MATTER IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE CHAUNSKAYA BAY (EAST SIBERIAN SEA)

Natalina A. Poltavskaya¹,
geoikigai@tpu.ru

Elena V. Gershelis¹,
elenapanova@tpu.ru

Irina A. Oberemok¹,
genuine.i@yandex.ru

Andrey A. Grinko²,
andreyagrinko@gmail.com

Aleksandr N. Charkin²,
dudarev@poi.dvo.ru

Elena I. Yaroshchuk²,
e.yaroshchuk@poi.dvo.ru

Natalia A. Smirnova¹,
smirnova@hw.tpu.ru

Natalya V. Guseva¹,
gusevanv@tpu.ru

Oleg V. Dudarev²,
dudarev@poi.dvo.ru

Igor P. Semiletov^{2,1},
ipsemiletov@alaska.edu

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences,
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia.

The relevance of the study is determined by the need to assess the regional characteristics of transport and transformation of organic matter in various sedimentation and biogeochemical environments on the East Siberian Arctic Shelf, in particular in the less studied and remoted East Siberian Sea.

The main aim of the study is to determine the composition and sources of organic matter of bottom sediments of the Chaunskaya Bay (East Siberian Sea).

Objects: 25 surface bottom sediments sampled along the transect from the coastal zone of the Chaunskaya Bay to the inner part of the East Siberian Sea shelf during the marine expedition on the R/V «Academician Oparin» in September–October 2020.

Methods. Rock-Eval pyrolytic analysis was used to analyze groups of hydrocarbon compounds in organic matter from bottom sediments; the *n*-alkanes distribution was estimated based on the results of gas chromatography-mass-spectrometry. Grain size analysis was performed on a laser particle analyzer.

Results. The composition of sedimentary material in the Chaunskaya Bay is mainly determined by the features of the underwater relief and gravity flows of the incoming terrigenous material – products of local thermal abrasion of the coastal zone (Ayon Island) and river alluvium in the southeastern part of the bay. A certain role in the formation of the sedimentary appearance of the bay is presumably played by the processes of cryosol thawing as a result of the destruction of fast ice areas. Pyrolysis data and analysis of the distribution of *n*-alkanes for surface sediments indicate a mixed genesis of organic matter in surface sediments with a dominant contribution of terrestrial organic matter of a high degree of transformation and a high content of hardly decomposable humic substances and fulvic acids. The presence of autochthonous organic matter reflects the high productivity of the Chaunskaya Bay waters.

Key words:

organic carbon, bottom sediments, pyrolysis, molecular analysis, granulometric analysis, Chaunskaya Bay, East Siberian Sea, Arctic.

The work was carried out within the Russian Science Foundation project no. 21-77-00075 (EG; sedimentological and geochemical studies) with partial support of another Russian Science Foundation grant no. 21-77-30001 (IS; sampling pretreatment at the POI FEB RAS). The expedition to Chaunskaya Bay was funded under the project of the Russian National Science Foundation grant no. 19-17-00058 (AC) and the state task of the Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences grant no. AAAAA 20-120011090005-7.

REFERENCES

1. Tanski G., Bröder L., Wagner D., Knoblauch C., Lantuit H., Beer C., Sachs T., Fritz M., Tesi T., Koch B.P., Haghipour N., Eglinton T.I., Strauss J., Vonk J.E. Permafrost carbon and CO₂ pathways differ at contrasting coastal erosion sites in the Canadian Arctic. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9, pp. 1–20.
2. Jong D., Bröder L., Tanski G., Fritz M., Lantuit H., Tesi T., Haghipour N., Eglinton T.I., Vonk J.E. Nearshore zone dynamics determine pathway of organic carbon from eroding permafrost coasts. *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47, pp. 1–10.
3. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskoy V., Gustafsson Ö. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, pp. 64–70.
4. Capelle D.W., Kuzyk Z.Z.A., Papakyriakou, T., Guéguen C., Miller L.A., Macdonald R.W. Effect of terrestrial organic matter on ocean acidification and CO₂ flux in an Arctic shelf sea. *Progress in Oceanography*, 2020, vol. 185, pp. 1–14.
5. Vonk J.E., Sanchez-Garcia L., Van Dongen B.E., Alling V., Kosmach D., Charkin A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Shakhova N., Roos P., Eglinton T.I., Andersson A., Gustafsson A. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. *Nature*, 2012, vol. 489, pp. 137–140.
6. Wild B., Andersson A., Bröder L., Vonk J., Hugelius G., McClelland J.W., Song W., Raymond P.A., Gustafsson Ö. Rivers across the Siberian Arctic unearth the patterns of carbon release from

- thawing permafrost. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, vol. 116, pp. 10280–10285.
7. Brown N.J., Nilsson J., Pemberton P. Arctic Ocean freshwater dynamics: transient response to increasing river runoff and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, pp. 5205–5219.
8. Kunitzki M., Eicke N., Huber P., Köhler J., Zeller S., Voigtsberger J., Schlot, N., Heinrichs K., Sann H., Trinter F., Schmidt L.P.H., Kalinin A., Schöffler M.S., Jahnke T., Lein M., Dörner R. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂. *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, pp. 1–13.
9. Thackeray C.W., Hall A. An emergent constraint on future Arctic sea-ice albedo feedback. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, pp. 972–978.
10. Casas-Prat M., Wang X.L. Sea ice retreat contributes to projected increases in extreme Arctic Ocean surface waves. *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47, pp. 1–11.
11. Vetrov A.A., Romankevich E.A. *Carbon Cycle in the Russian Arctic Seas*. Moscow, Springer publ., 2004. 332 p.
12. Winterfeld M., Laepple T., Mollenhauer G. Characterization of particulate organic matter in the Lena River delta and adjacent nearshore zone, NE Siberia. P. I: Radiocarbon inventories. *Biogeoscience*, 2015, vol. 12, pp. 3769–3788.
13. Naidu A.S., Han M.W., Mowatt T.C., Wajda W. Clay minerals as indicators of sources of terrigenous sediments, their transportation and deposition: Bering Basin, Russian-Alaskan Arctic. *Marine Geology*, 1995, vol. 127, pp. 87–104.
14. Semiletov I., Dudarev O., Luchin V., Charkin A., Shin K.H., Tanaka N. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, pp. 1–5.
15. Jacobs P., Lenssen N.J.L., Schmidt G.A., Rohde R.A. *The Arctic is now warming four times as fast as the rest of the globe*. New Orleans, AGU Fall Meeting Publ., 2021. pp. A13E-02.
16. Petrova V.I., Batova G.I., Kursheva A.V., Litvinenko I.V., Savinov V.M., Savinova T.N. Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in the bottom sediments of the eastern Arctic shelf. *Oceanology*, 2008, vol. 48, pp. 196–203.
17. Salvadó J.A., Tesi T., Sundbom M., Karlsson E., Kruså M., Semiletov I.P., Panova E., Gustafsson Ö. Contrasting composition of terrigenous organic matter in the dissolved, particulate and sedimentary organic carbon pools on the outer East Siberian Arctic Shelf. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, pp. 6121–6138.
18. Gustafsson Ö., Van Dongen B.E., Vonk J.E., Dudarev O. V., Semiletov I.P. Widespread release of old carbon across the Siberian Arctic echoed by its large rivers. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 1737–1743.
19. Doğrul Selver A., Sparkes R.B., Bischoff J., Talbot H.M., Gustafsson Ö., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Boulton S., Van Dongen B.E. Distributions of bacterial and archaeal membrane lipids in surface sediments reflect differences in input and loss of terrestrial organic carbon along a cross-shelf Arctic transect. *Organic Geochemistry*, 2015, vol. 83–84, pp. 16–26.
20. Dudarev O.V. *Sovremennyy litomorfogenez na Vostochno-Arkticheskom shelfe Rossii*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Modern litomorphogenesis on the Eastern Arctic shelf of Russia. Cand. Diss. Abstrcat]. Vladivostok, 2016. 49 p.
21. Patyk-Kara N.G., Ivanova A.M. *Geokhimicheskie poisky mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh na kontinentalnom shelfe* [Geochemical searches for deposits of solid minerals on the continental shelf]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2003. 415 p.
22. Gresov A.I. *Metanoresursnaya baza ugolnykh basseynov Dalnego Vostoka Rossii i perspektivy ee promyshlennogo osvoeniya. Ugolno-metanovye bassejny Respubliki Sakha (Yakutiya) i Severo-Vostoka* [Methane resource base of coal basins of the Russian Far East and prospects for its industrial development. Coal-methane basins of the Republic of Sakha (Yakutia) and the North-East]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2012. Vol. 2. 468 p.
23. Luchin V.A., Semiletov I.P. Interannual variability of water temperature in the Chukchi Sea DAN. *Doklady Earth Sciences*, 2005, vol. 405, no. 9, pp. 1419–1422. In Rus.
24. Pavlidis Yu.A., Nikiforov S.L. *Usloviya morfologogeneza v pribrezhnoy zone Mirovogo okeana* [Conditions of morpholithogenesis in the coastal zone of the World Ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 455 p.
25. Gagaev S.Y. *Ekosistemy, flora i fauna Chaunskoy guby Vostochno-Sibirskogo morya* [Ecosystems, flora and fauna of the Chaunskaya Bay of the East Siberian Sea]. ZIN RAS, 1994, vol. 47, pp. 266.
26. *Severo-Vostochnyy kompleksny nauchno-issledovatel'skiy institut im. Shilo Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk* [North-Eastern Integrated Research Institute named after N.A. Shilo of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences]. Available at: <https://neisri.ru/rffi-18-05-60036/2> (accessed 15 September 2022).
27. Valpeter A.P. Kharakternye formy reliefa pribrezhnogo shelfa Vostochno-Sibirskogo morya i ikh znachenie dlya paleogeograficheskikh rekonstruktsiy. Geomorfologiya i paleogeografiya shelfa [Characteristic relief forms of the coastal shelf of the East Siberian Sea and their significance for paleogeographic reconstructions. Geomorphology and paleogeography of the shelf]. *Materialy XII plenuma Geomorfologicheskoy komissii* [Materials of the XII Plenum of the Geomorphological Commission]. Moscow, Nauka Publ., 1978. pp. 134–139.
28. Hare A.A., Kuzyk Z.Z.A., Macdonald R.W., Sanei H., Barber D., Stern G.A., Wang F. Characterization of sedimentary organic matter in recent marine sediments from Hudson Bay, Canada, by Rock-Eval pyrolysis. *Organic Geochemistry*, 2014, vol. 68, pp. 52–60.
29. Liebezeit G., Wiesner M.G. Pyrolysis of recent marine sediments-I. Biopolymers. *Organic Geochemistry*, 1990, vol. 16, pp. 1179–1185.
30. Marchand C., Lallier-Vergès E., Baltzer F. The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, vol. 56, pp. 119–130.
31. Gershelis E., Grinko A., Oberemok I., Klevantseva E., Poltavskaya N., Ruban A., Chernykh D., Leonov A., Guseva N., Semiletov I. Composition of sedimentary organic matter across the Laptev Sea Shelf: evidences from Rock-Eval parameters and molecular indicators. *Water*, 2020, vol. 12, pp. 1–21. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3511> (accessed 14 December 2020).
32. Behar F., Beaumont V. De H.L. Technologie Rock-Eval 6: performances et développements. *Oil and Gas Science and Technology*, 2001, vol. 56, pp. 111–134.
33. Shepard F.P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, vol. 24, pp. 151–158.
34. Folk R.L., Ward W.C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Sediment. Petrol*, 1957, vol. 27, pp. 3–26.
35. Dudarev O.V., Charkin A.N., Semiletov I.P., Shilo I.N., Sal'yuk A.N., Spivak E.A. On the current state of underwater island relics on the East Siberian shelf. *Reports of the Academy of Sciences*, 2008, vol. 419, pp. 255–261. In Rus.
36. Dudarev O.V., Charkin A.N., Semiletov I.P., Von J., Gustafsson Ö., Anderson P. Vostochno-Sibirskiy shelf: osobennosti sovremennogo morfologogeneza v geologii morey i okeanov [East Siberian Shelf: features of modern morpholithogenesis in Geology of the Seas and Oceans]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (shkoly) v morskoy geologii* [Proceedings of the XVIII International Scientific Conference (School) In Marine Geology]. Moscow, Nauka Publ., 2009. Vol. I, pp. 35–38.
37. McLaren P. An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Research*, 1981, vol. 51, pp. 611–624.
38. Passega R. Texture as characteristic of clastic deposition. *AAPG Bulletin*, 1957, vol. 41, pp. 1952–1984.
39. Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, vol. 34, pp. 830–847.
40. Johnson J.E., MacLeod D.R., Phillips S.C., Phillips M.P., Divins D.L. Primary deposition and early diagenetic effects on the high saturation accumulation of gas hydrate in a silt dominated reservoir in the Gulf of Mexico. *Marine Geology*, 2022, vol. 444, pp. 1–22.
41. Stein R., Macdonald R. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin, Springer Publ., 2004. 314 p.
42. Bröder L., Andersson A., Tesi T., Semiletov I., Gustafsson O. Quantifying degradative loss of terrigenous organic carbon in surface sediments across the Laptev and East Siberian Sea. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, vol. 33, pp. 85–99.

43. Lüniger G., Schwark L. Characterisation of sedimentary organic matter by bulk and molecular geochemical proxies: an example from oligocene maar-type Lake Enspel, Germany. *Sedimentary Geology*, 2002, vol. 148, pp. 275–288.
44. Marchand C., Lallier-Vergès E., Disnar J.R., Kéravis D. Organic carbon sources and transformations in mangrove sediments: a Rock-Eval pyrolysis approach. *Organic Geochemistry*, 2008, vol. 39, pp. 408–421.
45. Melenevskii V.N., Leonova G.A., Konyshov A.S. The organic matter of the recent sediments of Lake Beloe, West Siberia (from data of pyrolytic studies). *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, pp. 583–592.
46. Carrie J., Sanei H., Stern G. Standardisation of Rock-Eval pyrolysis for the analysis of recent sediments and soils. *Organic Geochemistry*, 2012, vol. 46, pp. 38–53.
47. Disnar J.R., Guillet B., Keravis D., Di-Giovanni C., Sebag D. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Organic Geochemistry*, 2003, vol. 34, pp. 327–343.
48. Poot A., Quik J.T.K., Veld H., Koelmans A.A. Quantification methods of Black Carbon: comparison of Rock-Eval analysis with traditional methods. *Journal of Chromatography A*, 2009, vol. 1216, pp. 613–622.
49. Meyers P.A., Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, 1993, vol. 20, pp. 867–900.
50. Marchand C., Disnar J.R., Lallier-Vergès E., Lottier N. Early diagenesis of carbohydrates and lignin in mangrove sediments subject to variable redox conditions (French Guiana). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, vol. 69, pp. 131–142.
51. Hetényi M., Nyilas T., Sajgó C., Brukner-Wein A. Heterogeneous organic matter from the surface horizon of a temperate zone marsh. *Organic Geochemistry*, 2006, vol. 37, pp. 1931–1942.
52. Perminova I.V., Petrosyan V.S. Morskie guminovye kisloty v potoke organicheskogo ugleroda v ekosistemakh Beringova/Chukotskogo morey [Marine humic acids in the organic carbon flux in the Bering/Chukchi Seas ecosystems]. *Materialy konferentsii po krugovorotu ugleroda v boreal'nykh lesakh i subarkticheskikh ekosistemakh* [Proceedings of the Conference on Carbon Cycling in the Boreal Forests and Subarctic Ecosystems]. Corvallis, EPA/MR-126546 OSU Publ., 1991. pp. 37–42.
53. Hayes M.H.B., Mylotte R., Swift R.S. Humin: its composition and importance in soil organic matter. *Advances in Agronomy*, 2017, vol. 143, pp. 47–138.
54. Kruege M.A., Mukhopadhyay P.K., Lewis C.F.M. A molecular evaluation of contaminants and natural organic matter in bottom sediments from western Lake Ontario. *Organic Geochemistry*, 1998, vol. 29, pp. 1797–1812.
55. Mayer L.M. Relationships between mineral surfaces and organic carbon concentrations in soils and sediments. *Chemical Geology*, 1994, vol. 114, pp. 347–363.
56. Wakeham S.G., Canuel E.A., Lerberg E.J., Mason P., Sampere T.P., Bianchi T.S. Partitioning of organic matter in continental margin sediments among density fractions. *Marine Chemistry*, 2009, vol. 115, pp. 211–225.
57. Tesi T., Semiletov I., Dudarev O., Andersson A., Gustafsson Ö. Matrix association effects on hydrodynamic sorting and degradation of terrestrial organic matter during cross-shelf transport in the Laptev and East Siberian shelf seas. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, pp. 731–752.
58. Ausin B., Bruni E., Haghipour N., Welte C., Bernasconi S.M., Eglinton T.I. Controls on the abundance, provenance and age of organic carbon buried in continental margin sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, vol. 558, pp. 116–759.
59. Hong H., Chen S., Fang Q., Algeo T.J., Zhao L. Adsorption of organic matter on clay minerals in the Dajiuhe peat soil chronosequence. *Applied Clay Science*, 2019, vol. 178, pp. 105–125.
60. Blattmann T.M., Liu Z., Zhang Y., Zhao Y., Haghipour N., Montluçon D.B., Plötte M., Eglinton T.I. Mineralogical control on the fate of continentally derived organic matter in the ocean. *Science*, 2019, vol. 366, pp. 742–745.
61. Eglinton G., Hamilton R.J. Leaf epicuticular waxes. *Science*, 1967, vol. 156, pp. 1322–1335.
62. Tissot B.P., Welte D.H. *Petroleum Formation and Occurrence*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 1984. 702 p.
63. Stein R., Macdonald R.W., Naidu A.S., Yunker M.B., Gobeil C., Cooper L.W., Grebmeier J.M., Whitedge T.E., Hameedi M.J., Petrova V.I., Batova G.I., Zinchenko A.G., Kursheva A.V., Narkevskiy E.V., Fahl K., Vetrov A., Romankevich E.A., Birgel D., Schubert C., Harvey H.R., Weiel D. Organic carbon in Arctic Ocean sediments: sources, variability, burial, and paleoenvironmental significance. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2004. pp. 169–314.
64. Feng X., Gustafsson O., Holmes R.M., Vonk J.E., Van Dongen B.E., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Yunker M.B., Macdonald R.W., Montluçon D.B., Eglinton T.I. Multi-molecular tracers of terrestrial carbon transfer across the pan-Arctic: comparison of hydrolyzable components with plant wax lipids and lignin phenols. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, pp. 4841–4860.
65. Stevenson M.A., Abbott G.D. Exploring the composition of macromolecular organic matter in Arctic Ocean sediments under a changing sea ice gradient. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2019, vol. 140, pp. 102–111.

Received: 5 October 2022.

Reviewed: 9 January 2023.

Information about the authors

Natalina A. Poltavskaya, postgraduate student, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena V. Gershelis, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Irina A. Oberemok, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey A. Grinko, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr N. Charkin, Cand. Sc., head of the Laboratory of Advanced Methods of Marine Research, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences.

Elena I. Yaroshchuk, leading engineer, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences.

Natalya A. Smirnova, head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalya V. Guseva, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg V. Dudarev, Dr. Sc., leading researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences.

Igor P. Semiletov, corresponding member of the RAS, Dr. Sc., head of the laboratory, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.