

УДК 551.35

DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4415

Шифр специальности ВАК: 1.6.4

Органическое вещество донных осадков Чаунской губы (Восточно-Сибирское море): результаты пиролитического анализа по методу Rock-Eval

Н.А. Полтавская^{1✉}, Е.В. Гершелис¹, А.Н. Чаркин²,
Е.И. Ярощук², Н.В. Гусева¹, И.П. Семилетов^{2,1}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

✉ geoikigai@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования продиктована необходимостью оценки функционирования биогеохимического режима арктического региона путем изучения геохимических свойств органического вещества донных осадков на примере Чаунской губы (акватория Восточно-Сибирского моря). *Цель:* изучение пространственной изменчивости геохимических параметров органического вещества донных осадков Чаунской губы с применением метода Rock-Eval, а также выявление возможной взаимосвязи между параметром C_{org} и пелитовой фракцией. *Объекты:* пробы донных осадков Чаунской губы (акватория Восточно-Сибирского моря). Отбор проб происходил поэтапно с трех горизонтов (верхний 0–2 см, промежуточный 2–5 см, нижележащий 5–10 см) во время комплексной научной экспедиции на борту НИС «Академик Опарин» в сентябре–октябре 2020 г. *Методы:* гранулометрический состав донных осадков определялся на анализаторе частиц Analysette 22 NanoTec (Fritsch, Германия). Анализ углеводородных соединений органического вещества был выполнен с помощью пиролитического анализа на приборе Rock Eval 6 Turbo компании Vinci Technologies, Франция. *Результаты.* Рассмотренные нами результаты пиролитического анализа показали, что определяющую роль в формировании состава C_{org} донных осадков Чаунской губы играют такие факторы, как первичная продуктивность вод исследуемой акватории и процессы эрозии береговой зоны. Также мы не исключаем вклад речного стока в состав C_{org} губы, однако считаем его небольшим ввиду незначительного поступления речных наносов в воды исследуемого района. Полученные нами пиролитические данные указывают на то, что в составе C_{org} донных осадков исследуемого района присутствует как морская компонента (первичная продуктивность), так и терригенная (эрозия берегового комплекса).

Ключевые слова: пиролиз, органическое вещество, гранулометрический состав, донные осадки, Восточно-Сибирское море, Арктика

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 23-77-10002 (седиментологические исследования), а также при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема #FSWW-2023-0010) (пиролитический анализ). Экспедиция в Чаунскую губу была выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А20-120011090005-7).

Для цитирования: Органическое вещество донных осадков Чаунской губы (Восточно-Сибирское море): результаты пиролитического анализа по методу Rock-Eval / Н.А. Полтавская, Е.В. Гершелис, А.Н. Чаркин, Е.И. Ярощук, Н.В. Гусева, И.П. Семилетов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 148–161. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4415

UDC 551.35

DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4415

Organic carbon in surface sediments of Chaunskaya Bay (East Siberian Sea): results of pyrolytic analysis using the Rock-Eval method

N.A. Poltavskaya¹✉, E.V. Gershelis¹, A.N. Charkin²,
E.I. Yaroshchuk², N.V. Guseva¹, I.P. Semiletov^{2,1}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

✉ geoikigai@tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to assess functioning of the biogeochemical regime of the Arctic region by studying geochemical properties of organic matter of bottom sediments on the example of the Chaunskaya Bay (East-Siberian Sea). **Aim.** To study the spatial variability of geochemical parameters of organic matter of bottom sediments of the Chaunskaya Bay using the Rock-Eval method, as well as to identify a possible relationship between the parameter TOC and the pelite fraction. **Objects.** Samples of bottom sediments of the Chaunskaya Bay (East Siberian Sea). Sampling took place in stages from three horizons (upper 0–2 cm, intermediate 2–5 cm, lower 5–10 cm) during a comprehensive scientific expedition to the R/V "Academician Oparin" in September–October 2020. **Methods.** Granulometric composition of bottom sediments was determined using the Analysette 22 NanoTec particle analyzer (Fritsch, Germany). The analysis of hydrocarbon compounds of organic matter was performed using pyrolytic analysis on the device (Rock Eval 6 Turbo of Vinci Technologies, France). **Results.** The results of pyrolytic analysis considered by the authors have shown that such factors as the primary productivity of the waters of the studied water area and the processes of erosion of the coastal zone play a decisive role in the formation of the composition of the TOC in bottom sediments of the Chaunskaya Bay. We also do not exclude the contribution of river runoff to the composition of the TOC in bottom sediments; however, we consider it small due to the insignificant inflow of river sediments into the waters of the studied area. The pyrolytic data obtained by us indicate that both the marine component (primary productivity) and the terrigenous component (coastal complex erosion) are present in the composition of the TOC in bottom sediments of the studied area.

Keywords: pyrolysis, organic matter, granulometric composition, bottom sediments, East Siberian Sea, Arctic

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 23-77-10002 (sedimentological research), as well as with the financial support of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic #FSWW-2023-0010) (pyrolytic analysis). The expedition to Chaunskaya Bay was carried out within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic № AAAA-A20-120011090005-7).

For citation: Poltavskaya N.A., Gershelis E.V., Charkin A.N., Yaroshchuk E.I., Guseva N.V., Semiletov I.P. Organic carbon in surface sediments of Chaunskaya Bay (East Siberian Sea): results of pyrolytic analysis using the Rock-Eval method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 148–161. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4415

Введение

В последние годы ученые уделяют все больше внимания изучению органического углерода ($C_{\text{орг}}$) донных осадков арктических морей, так как происходящие климатические изменения увеличивают темпы дестабилизации мерзлоты, которая хранит в себе огромные запасы законсервированного $C_{\text{орг}}$ (до 44 ± 10 Мт для Восточно-Сибирского арктического шельфа) [1–3]. Важно отметить, что, поступая на шельф, $C_{\text{орг}}$ при разрушении окисляется до двуокси углерода (CO_2). Это может привести к серьезному смещению экологического равновесия, в том числе ацидификации вод арктических морей [4], и увеличе-

нию эмиссии углекислого газа в атмосферу [5]. Основными источниками $C_{\text{орг}}$, согласно ранее проведенным исследованиям [6–11], являются сток крупных сибирских рек и продукты разрушения берегового ледового комплекса. Для формирования объективного представления о природе $C_{\text{орг}}$ Восточно-Сибирского арктического шельфа необходимо всесторонне изучить региональные особенности процессов переноса, преобразования и накопления $C_{\text{орг}}$ в различных седиментационных и биогеохимических обстановках. В данной работе мы изучаем $C_{\text{орг}}$ донных осадков Чаунской губы – аккумулятивной акватории с полузамкнутым водообменом, сообща-

ющимся с Восточно-Сибирским морем (ВСМ) через небольшой пролив. Данный район уникален своей спокойной литодинамической обстановкой, также в губе отсутствует крупный речной сток, а термоабразия береговой зоны носит зональный характер. Чаунская губа расположена между двумя биогеохимическими провинциями. С западной стороны ВСМ граничит с морем Лаптевых, $S_{орг}$ поступает в воды ВСМ с речным стоком (Лена, Индигирка и Колыма) и продуктами береговой эрозии, формируя западную биогеохимическую провинцию (ЗБП) [12]. С востока ВСМ граничит с Чукотским морем, откуда поступают тихоокеанские воды, обогащенные биогенными веществами [12]. Для изучения пространственной изменчивости геохимических параметров органического вещества донных осадков Чаунской губы мы применили пиролитический анализ по методу Rock-Eval. Данный анализ позволяет не только определить концентрацию $S_{орг}$, но и выявить определяющий вклад морской и наземной компоненты, а также определить степень дигенетического преобразования $S_{орг}$. Наряду с широко применяемыми молекулярным и изотопным анализами, данные пиролиза дополняют и расширяют геохимическую интерпретацию о природе $S_{орг}$ [13–16]. Тем не менее данные пиролитического анализа для $S_{орг}$ на Восточно-Сибирском арктическом шельфе в настоящее время ограничены. Полученные нами результаты мы объединили с ранее опубликованными данными по особенностям состава $S_{орг}$ донных осадков Чаунской губы [17] с целью получения более полной картины распределения состава и свойств $S_{орг}$ на данной акватории. Также мы сопоставили наши результаты с результатами по ВСМ [3, 18].

Материалы и методы исследования Фактический материал

Площадь опробования охватывает практически всю Чаунскую губу, за исключением западной мелководной части, расположенной ниже о. Айон (рис. 1). Гранулометрический и пиролитический анализы мы выполнили для 32 образцов донных осадков, отобранных с 18 станций с помощью коробчатого пробоотборника с трех различных горизонтов. Для образцов со станций 4, 61 и 82 мы про-

вели только гранулометрический анализ. Все образцы отбирались в ходе научной экспедиции на борту НИС «Академик Опарин» (сентябрь–октябрь 2020 г.). Образцы донных осадков помещали в морозильную камеру и хранили при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. После транспортировки образцов непосредственно в лабораторию ТПУ их размораживали при комнатной температуре $20\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методы исследования

Пиролитический анализ был выполнен на приборе Rock Eval 6 Turbo компании Vinci Technologies, Франция. Данный анализ представляет собой двухступенчатый процесс, сочетающий пиролиз в кислородной атмосфере и сжигание в кислородных условиях. Пробоподготовительные работы проходили в несколько этапов, на начальном этапе пробы размораживались при комнатной температуре, далее высушивались и гомогенизировались в фарфоровой ступке. По итогу навеску породы (донный осадок) массой 40 мг анализировали в температурном цикле «Reservoir» (рис. 2). Процедура начиналась со $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью нагрева $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ для высвобождения фракции легких летучих соединений и формирования пика $S1r$ (мг УВ/г). Дальнейший нагрев до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет получить двойной пик $S2a$ (мг УВ/г) и $S2b$ (мг УВ/г), в значительной степени указывающий на распад сложных молекул [15, 19]. Выделившиеся углеводороды измерялись пламенно-ионизационным детектором. Количества CO и CO_2 , представляющие пики $S3\text{CO}$ (мг $\text{CO}/\text{г}$) и $S3$ (мг $\text{CO}_2/\text{г}$), соответственно, непрерывно измерялись инфракрасным детектором на стадии пиролиза. Затем образец сжигали в окислительной камере, нагреваемой до $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью нагрева $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Эта дополнительная стадия окисления позволила определить значения остаточного органического углерода (RC – Residual Carbon, %) и неорганического углерода (MinC , % масс.). Общее содержание органического углерода (TOC – Total Organic Carbon) рассчитывали как сумму пиролизованной (PC – Pyrolysis Carbon, %) и остаточной фракций. Водородный индекс (HI – hydrogen index) и кислородный индекс (OI – oxygen index) определяются из соотношений $S2/\text{TOC}$ и $S3/\text{TOC}$ соответственно.

Таблица 1. Температурные условия цикла «Reservoir»

Table 1. Temperature mode for the «Reservoir» cycle

Стадия Stage	Начальная температура Initial temperature	Конечная температура Final temperature	Скорость нагрева, $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ Heating rate, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	Выдержка при начальной температуре Exposure at initial temperature	Выдержка при конечной температуре Exposure at final temperature
	$^{\circ}\text{C}$			мин/min	
Пиролиз Pyrolysis	180	650	25	10	0
Окисление Oxidation	300	850	20	1	5

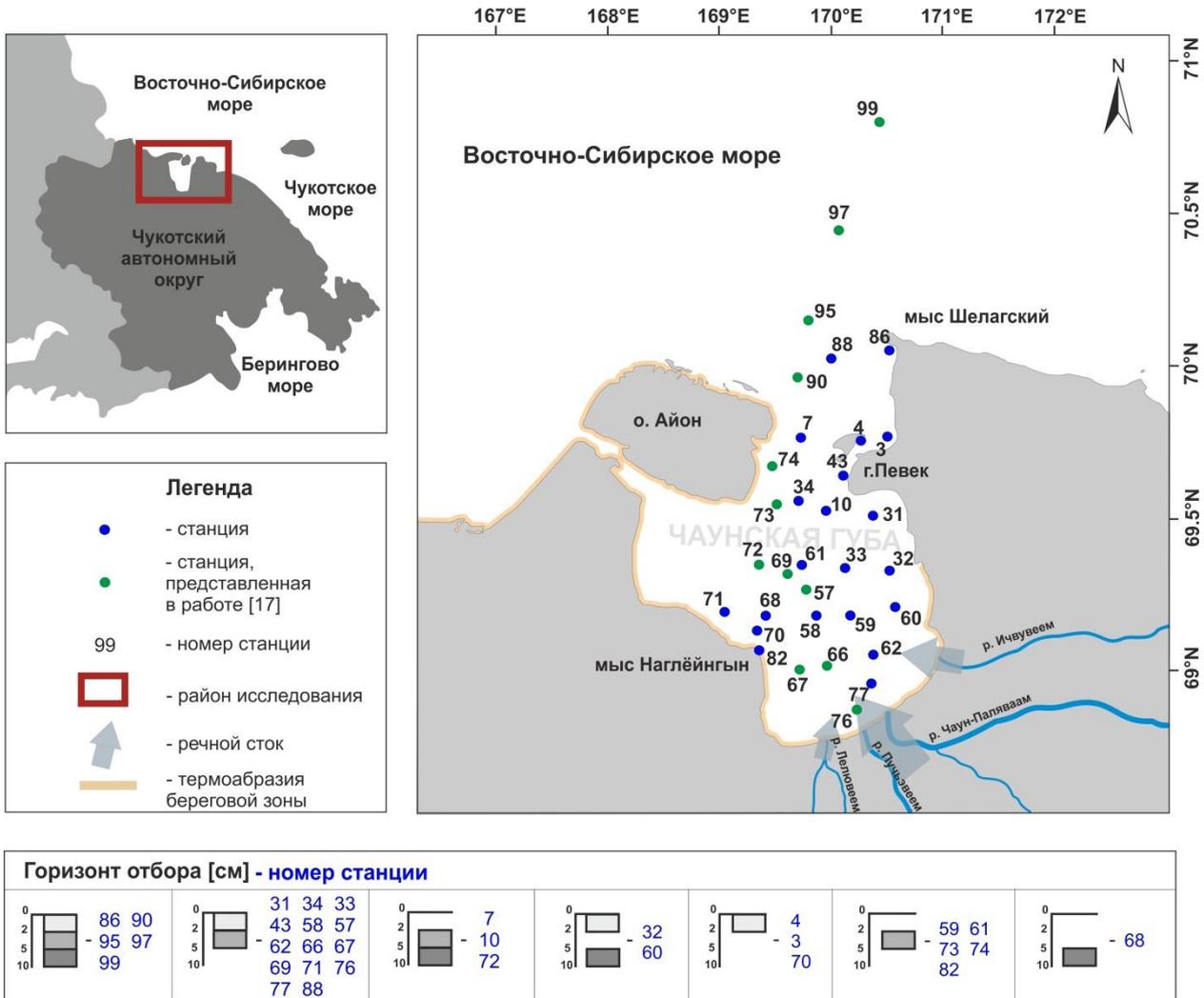


Рис. 1. Карта станций отбора проб в Чаунской губе и в прибрежных районах Восточно-Сибирского моря
Fig. 1. Map of sampling stations in the Chaunskaya Bay and in coastal areas of the East Siberian Sea

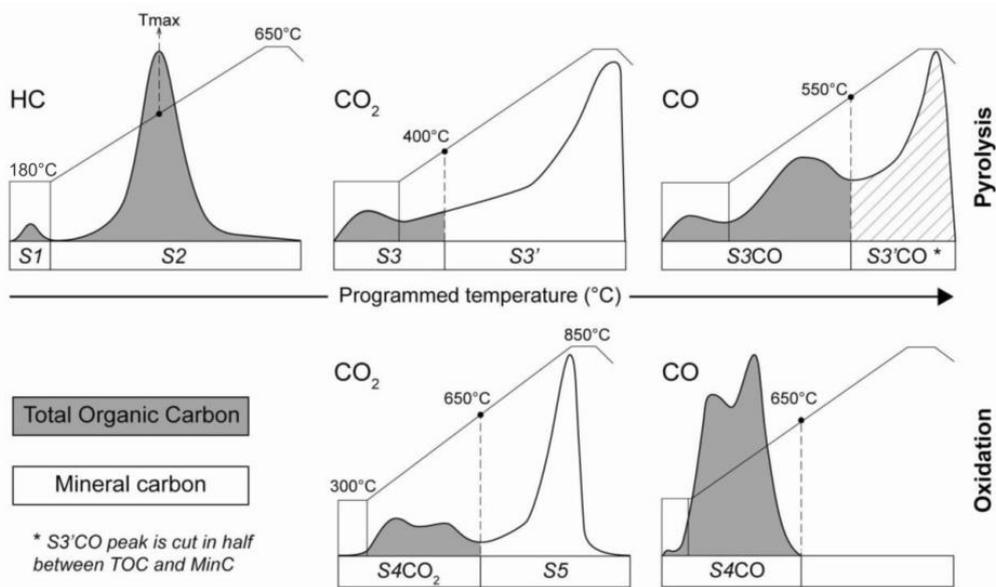


Рис. 2. График пиролиза в цикле «Reservoir» по данным [20]
Fig. 2. Pyrogram for the «Reservoir» cycle by [20]

Представленные результаты пиролитического анализа были ранее частично опубликованы в работе [17]. Новые данные охватывают практически всю акваторию Чаунской губы, что существенно дополняет представления о биогеохимической природе $C_{орг}$ в районе исследования.

Измерения размера зерна проводили с помощью лазерного анализатора частиц Analysette 22 NanoTec (Fritsch, Германия). Дисперсную среду создавали с помощью поверхностно-активных веществ ПАВ-901 (Fritsch, Германия). Калибровка выполнялась с применением сертифицированного стандарта F-500 (Fritsch, Германия). Измеренный спектр размеров частиц был представлен в виде % объема в логарифмической шкале, где объем вычислялся по диаметру частиц, принимая сферическую форму. Результаты пересчитывали на фракции пелита (<2 мкм), алевролита (2–63 мкм) и песка (>63 мкм), согласно работе [21]. Расчет статистических параметров выполнялся с использованием программного пакета GRADISTAT v.8.0 [22].

Результаты и обсуждение

Результаты гранулометрического анализа представлены в табл. 2. Донные осадки Чаунской губы состоят в основном из алевролита с примесью песка и пелита. Содержание алевролитовой фракции находится в пределах от 6,9 до 91,2 % при среднем $79,1 \pm 18$ %; песчаной от 0,1 до 92,7 при среднем $11,3 \pm 21,3$ %; пелитовой от 0,4 до 16,9 при среднем значении $10,2 \pm 4,3$ %. В данном исследовании мы расширили площадь опробования гранулометрического состава донных осадков, добавив новые станции к ранее опубликованным [17] (выделены знаком звездочка в табл. 2). Дополнительно для данных гранулометрического анализа мы использовали среднее значение по трем горизонтам (верхний 0–2 см, промежуточный 2–5 см, нижележащий 5–10 см). Наше решение обусловлено отсутствием сильного разброса в значениях между горизонтами. Мы приняли во внимание станции 76, 71 и 58 в южной, юго-западной и центральной частях Чаунского залива, где наблюдали большую разницу в количестве песчаного материала между поверхностным слоем (89,6; 26,6; 47,6 %) и промежуточным (1,6; 66,6; 5,8 %). Так, в районе устьевой области рек (станция 76, южная часть Чаунской губы) поверхностный слой на 89,6 % состоит из песчаного материала, а уже промежуточный слой состоит из алевролита (88,9 %) и пелита (9,5 %). Наличие большого количества песчаного материала только в поверхностном слое и нахождение станции 76 недалеко от устьевой области рек говорят нам как о возможном локальном воздействии речного стока, так и о влиянии приливно-отливных течений, или же циркуляции воды, в Чаунской губе. Также при-

сутствие песчаного материала для станции 71, вероятно, связано с наличием древних береговых комплексов в виде галечно-песчаных кос, баров [23, 24]. Однако данные ураганные пробы исключены из выборки, так как могут привести к неправильному определению среднего показателя. Дополнительно мы рассчитали гранулометрические параметры с использованием программного пакета GRADISTAT v.8.0 [22]. Медианный размер зерна Md (D_{50}) составил от 7,8 до 163,6, средний размер зерна Mz составил от 6,8 до 168,6. Увеличение этих параметров функционально обусловлено повышенными значениями критерия перемещения осадочного материала [17]. На рис. 2, а показано пространственное распределение медианного размера зерна (Md_{50}), с помощью которого можно проследить распространение осадочного материала по всей площади Чаунской губы. Донные осадки, распространённые на мелководье вдоль юго-западного и южного побережья Чаунской губы, характеризуются примесью крупной фракции песка (до 92,1 %). Осадок, расположенный в центральной части, а также в районе проливов (Средний и Певек), представлен алевролитовой фракцией. На выходе из губы (зона внутреннего шельфа ВСМ) наблюдается рост содержания пелитовой фракции. Наблюдается закономерность – с удалением от источника сноса осадочного материала, т. е. от прибрежной и береговой зоны, возрастает доля пелитового материала, так как более мелкие частицы могут быть транспортированы на большие расстояния водными потоками.

Таким образом, донные осадки Чаунской губы представлены разномерным осадочным материалом (песчано-алеврито-пелитовый), где преобладает преимущественно алевролитовая фракция. Примесь песчаного материала, вероятно, обусловлена подводно-аллювиальными речными наносами (южная часть Чаунского залива), а также эрозионными наносами со стороны юго-восточной прибрежной зоны и со стороны о. Айон. Распространение пелитового материала в центральной части Чаунской губы и в зоне внутреннего шельфа ВСМ обусловлено удалением от источника сноса осадочного материала, и также осажением глинистых частиц в стабильных подледных условиях, вне развития активных волновых процессов [17].

В табл. 3 приведены результаты пиролитического анализа донных осадков Чаунской губы. Содержание $C_{орг}$ в исследуемых пробах варьируется в пределах от 0,4 до 2,06 % при среднем значении $1,1 \pm 0,4$ %, что находится в пределах допустимых значений для Восточно-Сибирского арктического шельфа и для Арктики в целом [25–29]. Для поверхностного горизонта (0–2 см) $C_{орг}$ составил от 0,4 до 2,06 % при среднем значении $1,2 \pm 0,5$ %. Для

промежуточного слоя (2–5 см) $C_{орг}$ составил от 0,4 до 1,85 % при среднем значении $1,1 \pm 0,4$ %. Для нижележащего слоя (5–10 см) $C_{орг}$ от 0,6 до 1,53 % при среднем значении $1,2 \pm 0,3$ %. Значительной разницы в значениях $C_{орг}$ между горизонтами мы не наблюдали. Поэтому при дальнейшей интерпретации результатов использовали средние значения для каждой станции (рис. 3, б).

На основе количественных данных различных групп углеводородных соединений (пики S1, S2, S3) в донных осадках производится типизация $C_{орг}$. Для морского $C_{орг}$ характерно содержание более высоких концентраций S1 и S2. Для терригенного $C_{орг}$, который формировался в окислительных условиях, наблюдается более высокое содержание S3 и RC. Такие различия обуславливаются низкой концентрацией/отсутствием лигнина, представляющего собой кислородосодержащий полимер наземного происхождения, содержащегося в морском $C_{орг}$. А также для таких значений характерны

повышенные концентрации содержания липидных соединений [19]. В исследуемых образцах количество свободных низкомолекулярных углеводов (пик S1) составило от 0,1 до 0,99 при среднем $0,5 \pm 0,2$ мг/г. Содержание летучих продуктов термической деструкции ОВ (пик S2) составило от 0,3 до 3,98 мг/г при среднем $2,0 \pm 0,9$ мг/г. Содержание остаточного кислородсодержащего $C_{орг}$ (пик S3) составило от 0,7 до 4,68 при среднем $2,3 \pm 0,9$ мг/г. Количество пиролизируемого углерода (PC – pyrolysis carbon) в донных осадках составило от 0,1 до 0,58 при среднем $0,3 \pm 0,1$ %, при этом доля остаточного углерода (RC – residual carbon) в три раза выше PC и составила от 0,3 до 1,48 при среднем $0,9 \pm 0,3$ %. Таким образом, в исследуемых нами образцах, согласно данным различных групп углеводородных соединений, наблюдается в равной степени содержание морского и наземного $C_{орг}$ при условии возможности преобладания второго, так как наблюдается превышение значений RC относительно PC.

Таблица 2. Гранулометрическая характеристика донных осадков Чаунской губы (Восточно-Сибирское море)

Table 2. Grain size characteristics of bottom sediments of the Chaunskaya Bay (East Siberian Sea)

Станция Station	Долгота Longitude, °E	Широта Latitude, °N	Глубина, м Depth, m	Размерная типизация Grain size classes, %			Статистические параметры Grain size parameters	
				Пелит Clay	Алеврит Silt	Песок Sand	Md	Mz
				<2	2–63	>63		
			мкм			μm		
3	170,50	69,77	13	8,5	85,43	6,1	18,5	14,7
4	170,27	69,76	11	15,3	84,63	0,1	8,2	7,2
7	169,74	69,77	21	15,1±1,1	84,6±0,8	0,35±0,2	9,2±0,6	7,9±0,5
10	169,97	69,54	14	13,3±2,3	86,4±2,1	0,3±0,2	22,1±18,1	9,0±1,5
31	170,38	69,51	12	7,5±0,04	91,2±0,2	1,3 ±0,1	17,4 ± 0,4	13,9±0,2
32	170,55	69,35	11	8,5±2,5	90,4±1,9	1,2±0,6	16,4±3,0	13,1±2,6
33	170,14	69,36	15	12,5±1,2	86,5±0,1	0,9±1,3	11,3±2,0	9,3±1,6
34	169,69	69,55	20	14,9±0,6	84,9±0,6	0,1±0,01	8,9±0,3	7,6±0,2
43	170,11	69,64	23	11,4±0,6	86,2±1,1	2,4±1,7	13,3±1,3	10,9±1,0
57*	169,77	69,27	16,0	15,8±0,2	84,1±0,3	0,1±0,1	7,9± 0,1	7,0±0,1
58	169,86	69,18	15	9,8	84,30	5,8	16,2	13,2
59	170,19	69,21	15	11,3	88,31	0,4	12,2	9,9
60	170,57	69,20	11	7,6±2,4	90,2±1,8	2,1±0,6	18,3±2,6	14,7±2,5
61	169,75	69,37	18	13,2	86,59	0,2	10,2	8,5
62	170,38	69,05	12	6,7±0,4	91,1±0,4	2,2±0,8	18,9±0,8	15,2±0,7
66*	169,98	69,05	14,1	8,6±2,5	87,2±2,0	4,2±4,5	17,6±5,8	14,1±4,4
67*	169,73	69,04	13,7	7,1±0,2	75,6±5,3	17,2±5,5	27,4±2,8	20,6±2,1
68	169,42	69,21	12	13,5	79,93	6,5	13,5	11,3
69*	169,62	69,34	10,0	8,4±4,0	80,4±11,3	11,2±15,3	24,2±17,9	18,0±11,9
70	169,34	69,13	10	2,9	28,00	69,1	129,4	81,5
71	169,05	69,22	9	4,9	68,40	26,6	37,2	28,3
72*	169,36	69,37	9,6	5,7±1,6	71,4±2,6	22,9±4,2	37,2±5,4	26,6±4,8
73*	169,52	69,56	11,3	4,7	49,05	46,2	59,0	41,6
74*	169,48	69,68	11,3	5,8	76,76	17,5	31,7	23,4
76*	170,23	68,87	9,0	9,5	88,90	1,6	15,1	12,0
77	170,36	68,96	11	6,1±0,4	83,4±5,2	10,5±4,8	25,6±2,9	19,9±1,5
82	169,36	69,07	2	0,5	6,85	92,7	163,6	168,6
86	170,50	70,06	21	16,9±4,1	82,9±3,8	0,2±0,2	7,8±2,5	6,8±1,9
88	170,02	70,02	15	12,3±0,8	87,1±0,01	0,6±0,7	11,2±2,0	9,3±1,4
90*	169,71	69,96	13,7	15,8±1,4	83,9±1,1	0,3±0,3	8,5±1,2	7,4±1,0
95*	169,81	70,14	19,3	16,8±3,9	82,9±3,7	0,3±0,3	7,9±2,1	7,1±1,6
97*	170,07	70,45	27,5	13,9±0,6	85,9±0,7	0,1±0,2	8,5±0,9	7,5±0,7
99*	170,43	70,80	28,2	13,3±1,2	86,6±1,1	0,1±0,1	8,1±2,1	7,0±1,7

Расшифровка параметров Md и Mz приведена в тексте/Parameters Md и Mz are explained in the text; *данные, представленные в работе [17]/data presented in [17].

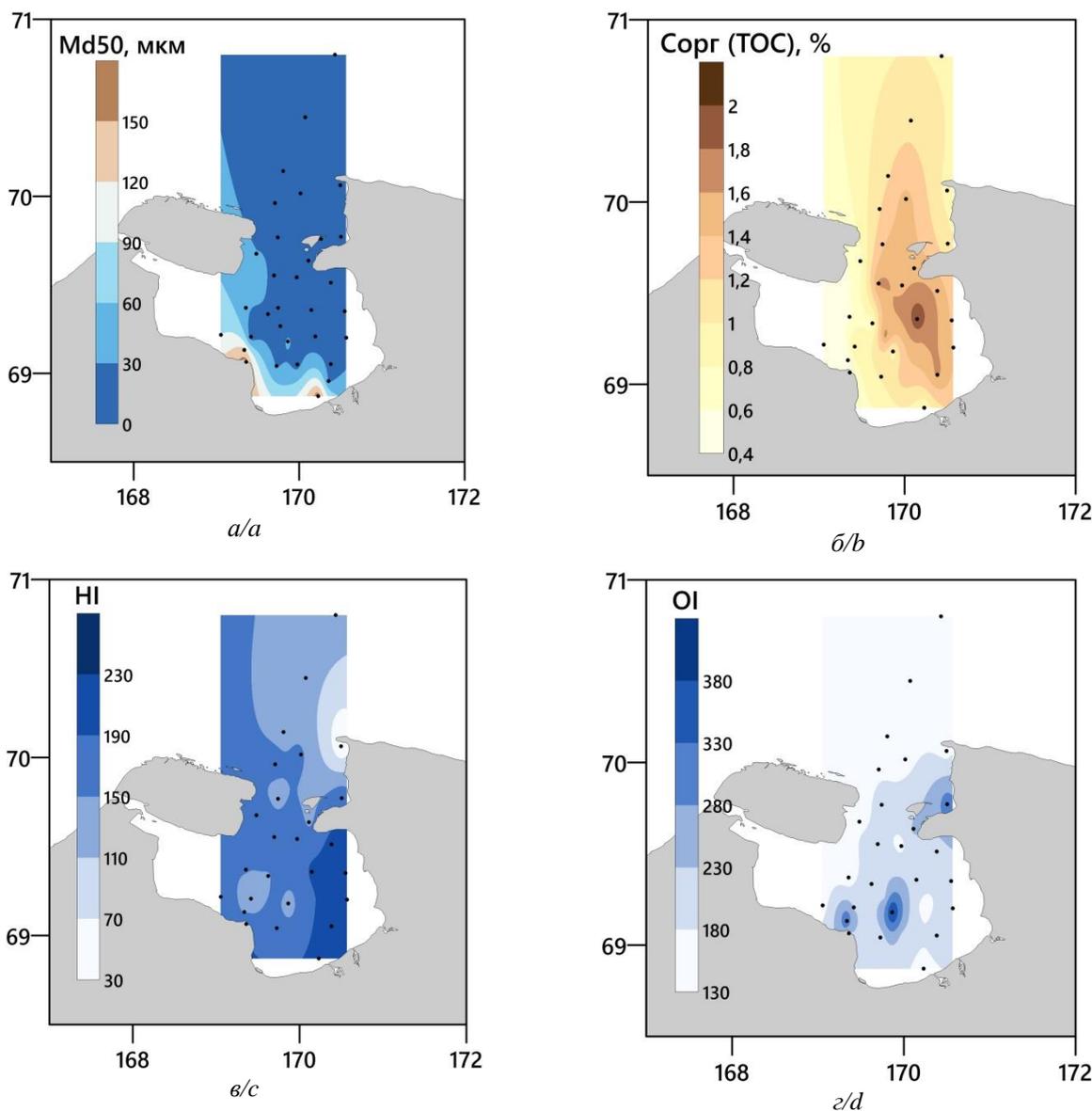


Рис. 3. Карты пространственного распределения: а) медианного размера зерна ($Md50$) в донных осадках Чаунской губы (Восточно-Сибирское море); б) органического вещества $C_{орг}$ (ТОС), % в донных осадках Чаунской губы; в) водородного индекса (HI), мг УВ/г $C_{орг}$ в донных осадках Чаунской губы; г) кислородного индекса (OI), мг CO_2 /г $C_{орг}$

Fig. 3. Spatial distribution maps: a) median grain size ($Md50$) in bottom sediments of the Chaunskaya Bay (East Siberian Sea); b) organic matter of TOC, % in bottom sediments of the Chaunskaya Bay; c) hydrogen index (HI), mg of HC/g of TOC in the bottom sediments of the Chaunskaya Bay; d) oxygen index (OI), mg CO_2 /g TOC

Окисление $C_{орг}$ и дальнейшие его преобразования отражаются на значениях индексов HI и OI. Для исследованных образцов HI составил от 34 до 232 при среднем значении 166 ± 34 мг УВ/г $C_{орг}$ (рис. 3, в); OI составил от 135 до 571 при среднем 199 ± 63 мг CO_2 /г $C_{орг}$ (рис. 3, г). Наибольшие значения OI наблюдаются в центральной части Чаунской губы (станция 58, поверхностный горизонт), в юго-западной части (станция 70, поверхностный горизонт) и в районе пролива Певек (станция 3, поверхностный горизонт), что указывает на активные процессы деградации и минерализации, происхо-

дящие в данных районах. Хотелось бы отметить превышение OI для поверхностного окисленного горизонта 58 станции почти в 2 раза относительно промежуточного горизонта (нижележащий горизонт отсутствует для данной станции), что коррелирует с изменениями гранулометрического состава, где горизонт 0–2 на 48 % состоит из песчаного материала.

Проведенные ранее исследования показали, что значение HI в ~ 100 мг УВ/г $C_{орг}$ рассматривается как усредненное переходное значение между морским и терригенным типом $C_{орг}$ в осадках арктиче-

ских морей [30, 31]. Для $C_{\text{орг}}$ морского происхождения значения HI находятся в диапазоне (~200–300 мгУВ/г $C_{\text{орг}}$), в то время как для терригенного $C_{\text{орг}}$ значения HI меньше 100 мгУВ/г $C_{\text{орг}}$. Похожая картина наблюдалась в Карском море, где значения $HI > 100$ мгУВ/г $C_{\text{орг}}$ были зафиксированы в глубоководных районах близ кромки шельфа, а значения $HI < 100$ мгУВ/г $C_{\text{орг}}$ фиксировались в прибрежной части, район устьев рек Оби и Енисея [31]. Данное распределение наблюдалось также и для залива Гудзон [30]. Однако для осадков моря Лаптевых и ВСМ, напротив, максимальные значения HI отмечались для прибрежных районов [18]. Данные результаты послужили дополнительным подтверждением ранее сформулированной гипотезы об увеличении доли свежесинтезированного и слабопреобразованного $C_{\text{орг}}$ вдоль побережья Сибирской Арктики по направлению с запада на восток [32]. Для донных осадков Чаунской губы максимальные HI (208, 217, 227, 232 мгУВ/г $C_{\text{орг}}$) наблюдаются в юго-восточной части исследуемого района (станции 31, 32, 60, 76), при этом в целом по всему заливу значения $HI \geq 150$ мгУВ/г $C_{\text{орг}}$, что может свидетельствовать об усилении вклада первичной продукции, обусловленного слабым воздействием речного стока, циклонической циркуляции вод и термоабразии береговой зоны в Чаунской губе. По мере удаления от залива, в районе мыса Шелагский, а также в районе станции 82 значения HI резко снижаются до 34 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$, что указывает на отсутствие прямого источника свежесинтезированного $C_{\text{орг}}$.

На базе диаграммы Ван-Кревелена мы построили модифицированную диаграмму зависимости HI от OI индексов для уточнения генезиса $C_{\text{орг}}$. Данная диаграмма традиционно используется в нефтяной геохимии с целью типизации керогена в соответ-

ствии с генезисом исходного $C_{\text{орг}}$. Согласно представленной диаграмме, I тип характерен для морского $C_{\text{орг}}$, II тип – для смешанного $C_{\text{орг}}$ и III тип – для терригенного $C_{\text{орг}}$ [18] (рис. 4). Значения HI и OI преимущественно попадают в область, относящуюся ко второму типу, отвечающему за смешанный генезис $C_{\text{орг}}$. Несколько станций попадают или граничат с третьим типом, однако мы считаем, что для донных осадков Чаунской губы характерно наличие смешанного типа $C_{\text{орг}}$. Это также подтверждает выводы, представленные выше.

Свежесинтезированное $C_{\text{орг}}$ донных отложений характеризуется высокими значениями отношения HI/OI (>2), тогда как для $C_{\text{орг}}$, претерпевшее цикл диагенетических преобразований, значения отношения HI/OI снижаются. Для донных осадков Чаунской губы отношение HI/OI составило от 0,2 до 1,5 при среднем значении $0,9 \pm 0,3$, что может указывать на начальные процессы переработки и деградации ОВ в районе исследования. Однако вместе с вышперечисленными выводами полученные результаты не исключают приток свежесинтезированного $C_{\text{орг}}$ в донных осадках Чаунской губы.

Параметр T_{peak} , температура максимального выхода УВ, характеризует термическую стабильность $C_{\text{орг}}$ и может служить дополнительным индикатором для определения источника $C_{\text{орг}}$ [33]. Высокие значения T_{peak} характерны для продуктов разложения незрелых гумусовых веществ (420–470 °С), обнаруженных в органоминеральных горизонтах почв [13]. Морские гумусовые кислоты распространены среди арктических морских водорослей и, соответственно, повсеместно присутствуют в осадках арктических шельфовых морей [34]. Гуминовые вещества также составляют значительную долю терригенного $C_{\text{орг}}$ [34].

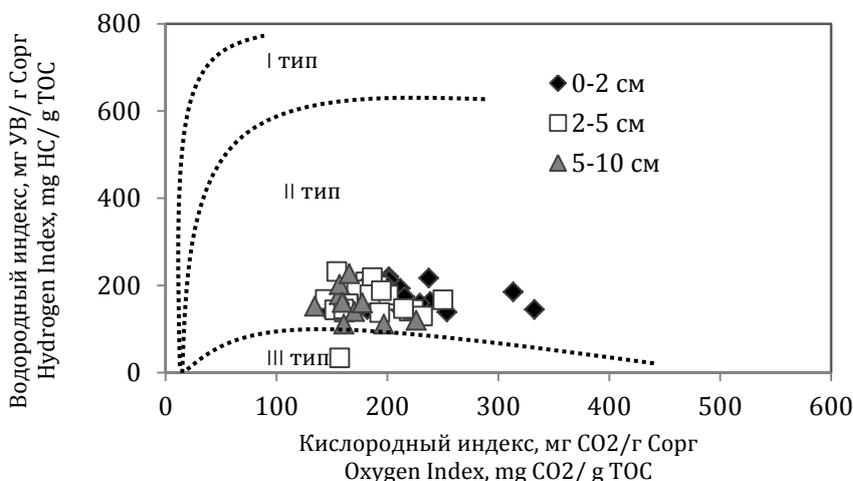


Рис. 4. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена для поверхностных осадков Чаунской губы (Восточно-Сибирское море)

Fig. 4. Modified Van Krevelen-type diagram of surface sediments across the Chaunskaya Bay (East Siberian Sea)

Таблица 3. Параметры Rock-Eval для образцов поверхностных осадков, отобранных на акватории Чаунской губы (Восточно-Сибирское море)

Table 3. Rock-Eval parameters for Chaunskaya Bay (East-Siberian Sea) surface sediments

Образец Station	Горизонт отбора, см Sampling horizon, cm	Глубина, м Depth, m	Треак, °C	S1r, мгHC/g	S2b, мгHC/g	S3, мгHC/g	PC, %	RC, %	C _{орг} TOC, %	HI	OI	Min C, %	HI/OI
3	0-2	13,0	465	0,39	1,92	3,26	0,31	0,73	1,04	185	313	0,2	0,6
7	2-5	21,0	461	0,53	2	3,12	0,33	1,09	1,42	141	220	0,1	0,6
	5-10		463	0,52	1,84	2,23	0,29	1,02	1,31	140	170	0,09	0,8
10	2-5	14,0	461	0,57	2,9	2,73	0,39	1,15	1,54	188	177	0,11	1,1
	5-10		462	0,64	2,74	2,4	0,38	1,15	1,53	179	157	0,11	1,1
31	0-2	12,0	461	0,63	2,91	3,14	0,41	1,1	1,51	193	208	0,14	0,9
	2-5		463	0,73	3,28	2,85	0,45	1,13	1,58	208	180	0,11	1,2
32	0-2	11,0	464	0,71	3,08	3,37	0,43	0,99	1,42	217	237	0,11	0,9
	5-10		464	0,51	2,67	2,07	0,35	0,97	1,32	202	157	0,09	1,3
33	0-2	15,0	458	0,99	3,98	4,36	0,58	1,48	2,06	193	212	0,18	0,9
	2-5		462	0,87	3,68	3,53	0,52	1,33	1,85	199	191	0,13	1,0
34	0-2	20,0	458	0,57	2,46	3,09	0,36	1,34	1,7	145	182	0,16	0,8
	2-5		459	0,45	3,01	2,89	0,4	1,16	1,56	193	185	0,15	1,0
43	0-2	23,0	454	0,55	2,1	3,83	0,35	1,16	1,51	139	254	0,22	0,5
	2-5		460	0,48	2,1	3,24	0,33	1,12	1,45	145	223	0,15	0,6
57*	0-2	16,0	451	0,62	2,87	4,2	0,44	1,32	1,76	163	239	0,17	0,7
	2-5		453	0,73	2,67	3,18	0,41	1,2	1,61	166	198	0,16	0,8
58	0-2	15,0	462	0,16	1,05	4,68	0,25	0,57	0,82	128	571	0,16	0,2
	2-5		458	0,37	1,27	2,27	0,22	0,76	0,98	130	232	0,11	0,6
59	2-5	15,0	463	0,73	2,94	2,67	0,41	1,14	1,55	190	172	0,11	1,1
60	0-2	11,0	463	0,66	3,24	2,96	0,43	1,04	1,47	220	201	0,12	1,1
	5-10		466	0,61	2,91	2,12	0,38	0,9	1,28	227	166	0,09	1,4
62	0-2	12,0	465	0,74	3,9	3,69	0,52	1,31	1,83	213	202	0,16	1,1
	2-5		466	0,57	3,21	2,74	0,42	1,05	1,47	218	186	0,14	1,2
66*	0-2	14,1	449	0,47	2,11	3,05	0,32	1,01	1,33	159	229	0,15	0,7
	2-5		453	0,46	2,4	2,71	0,34	1,01	1,35	178	201	0,11	0,9
67*	0-2	13,7	448	0,75	2,24	2,78	0,35	0,94	1,29	174	216	0,13	0,8
	2-5		455	0,42	1,36	1,4	0,2	0,56	0,76	179	184	0,1	1,0
68	5-10	12,0	459	0,37	1,25	2,35	0,23	0,81	1,04	120	226	0,11	0,5
69*	0-2	10,0	449	0,37	1,15	1,67	0,19	0,6	0,79	146	211	0,11	0,7
	2-5		453	0,24	0,91	1,33	0,14	0,48	0,62	147	215	0,07	0,7
70	0-2	10,0	452	0,13	0,58	1,33	0,1	0,3	0,4	145	333	0,06	0,4
71	0-2	9,0	454	0,16	0,78	0,76	0,11	0,33	0,44	177	173	0,07	1,0
	2-5		465	0,21	0,84	0,72	0,12	0,38	0,5	168	144	0,06	1,2
72*	2-5	9,6	451	0,25	0,89	0,94	0,13	0,44	0,57	156	165	0,07	0,9
	5-10		454	0,27	0,88	0,78	0,13	0,45	0,58	152	134	0,07	1,1
73*	2-5	11,3	451	0,51	1,71	1,77	0,25	0,66	0,91	188	195	0,09	1,0
74*	2-5		454	0,29	1,09	1,14	0,16	0,55	0,71	154	161	0,08	1,0
76*	0-2	9,0	456	0,23	0,86	0,91	0,12	0,37	0,49	176	186	0,05	0,9
	2-5		462	0,62	2,69	1,79	0,35	0,81	1,16	232	154	0,08	1,5
77	0-2	11,0	462	0,23	1,34	1,28	0,18	0,47	0,65	206	197	0,07	1,0
	2-5		458	0,16	0,7	1,05	0,11	0,31	0,42	167	250	0,08	0,7
82	2-5	2,0	647	0,08	0,32	1,46	0,08	0,85	0,93	34	157	0,11	0,2
86	0-2	21,0	457	0,69	2,6	2,41	0,37	1,15	1,52	171	159	0,14	1,1
	2-5		452	0,62	2	2,32	0,31	1,13	1,44	139	161	0,09	0,9
	5-10		451	0,68	2,3	2,28	0,34	1,09	1,43	161	159	0,13	1,0
90*	0-2	13,7	449	0,33	1,63	1,89	0,24	0,82	1,06	154	178	0,11	0,9
	5-10		454	0,55	1,98	2,2	0,29	0,95	1,24	160	177	0,11	0,9
	2-5		446	0,61	1,96	2,04	0,29	0,95	1,24	158	165	0,14	1,0
95*	0-2	19,3	457	0,51	2,27	2,36	0,33	1,03	1,36	167	174	0,12	1,0
	2-5		453	0,28	1,45	1,54	0,21	0,8	1,01	144	152	0,1	0,9
	5-10		449	0,43	1,3	1,88	0,22	0,95	1,17	111	161	0,1	0,7
97*	0-2	27,5	451	0,65	2,26	2,49	0,34	1,14	1,48	153	168	0,14	0,9
	2-5		448	0,4	1,52	1,67	0,23	0,81	1,04	146	161	0,12	0,9
	5-10		441	0,37	1,07	1,89	0,2	0,76	0,96	111	197	0,09	0,6
99*	0-2	28,2	453	0,48	1,53	1,54	0,23	0,83	1,06	144	145	0,08	1,0
	2-5		455	0,46	1,2	1,68	0,2	0,67	0,87	138	193	0,1	0,7

Расшифровка параметров Треак, S1, S2, S3, PC, RC, TOC, HI, OI, MinC приведена в тексте (раздел «Материалы и методы исследований»)/Parameters Треак, S1, S2, S3, PC, RC, TOC, HI, OI, MinC are explained in the text (Section «Materials and methods»); *данные, представленные в работе [17]/Data presented in [17].

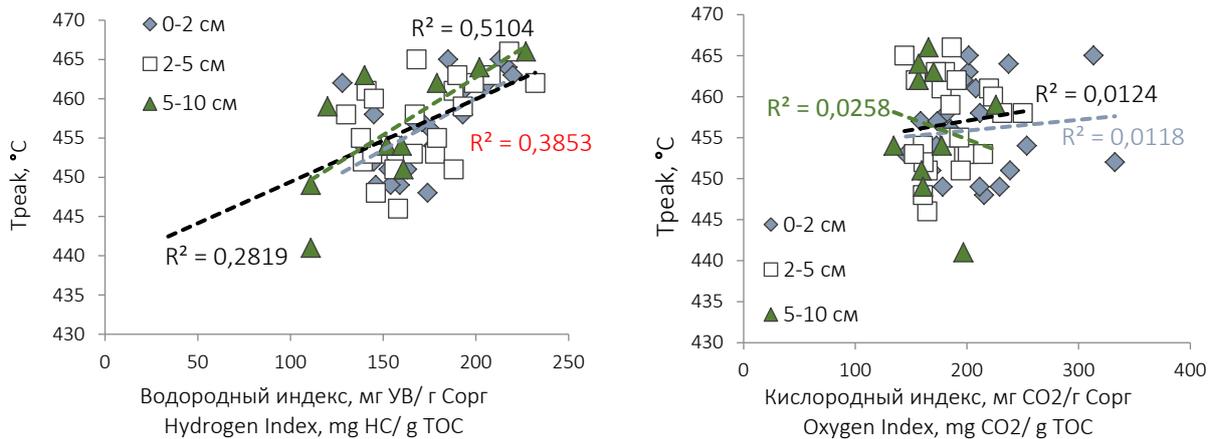


Рис. 5. Взаимосвязь водородного (слева) и кислородного индексов (справа) и параметра T_{peak} , °C
Fig. 5. Correlation of HI (left plot) and OI (right plot) and T_{peak} , °C

Значения T_{peak} для донных осадков исследуемого района находятся в диапазоне от 441 до 647 °C при среднем значении 460 ± 26 °C, что определяется наличием более термически-устойчивой гумусовой компоненты. Наши данные значительно отличаются от данных для центральной и северо-западной частей шельфа ВСМ [18], где значения T_{peak} не превышают 400 °C. На левом графике рис. 5 мы наблюдаем положительную корреляцию между T_{peak} и значениями HI для всех трех горизонтов. Особенно высокая корреляция наблюдается для нижнего горизонта ($R=0,72$ при достоверности аппроксимации $R^2=0,51$) и поверхностного горизонта ($R=0,62$ при достоверности аппроксимации $R^2=0,38$), что потенциально указывает на присутствие термически устойчивой морской компоненты в составе C_{org} донных осадков Чаунской губы. На правом графике корреляционная связь между T_{peak} и значениями OI полностью отсутствует.

По данным параметров T_{peak} , HI и OI особенно выделяется станция 82, район мыса Наглёйнгын, где фиксируется очень высокая температура выхода углеводородов (647 °C), минимальный водородный показатель (34 мг $CO_2/g C_{org}$) и максимальное количество содержания песчаного материала в донном осадке, что, вероятно, указывает на активные абразионные процессы, переносящие в более глубоководные зоны Чаунской губы песчаный материал с минимальным содержанием органического материала. Похожую картину мы наблюдаем и для станции 70, расположенной неподалеку от мыса Наглёйнгын.

Согласно работам [34–37], C_{org} адсорбируется преимущественно на минеральных поверхностях пелитовых частиц, что защищает его от микробной деградации и способствует сохранению. В исследуемых нами образцах донных осадков мы не наблюдаем линейной связи (при $R=0,315$ при достоверности аппроксимации $R^2=0,0995$) между долями пелитовых частиц и содер-

жанием C_{org} . При этом корреляция между содержанием пелитового материала и значениями OI и HI согласуется с ранее опубликованными данными [17].

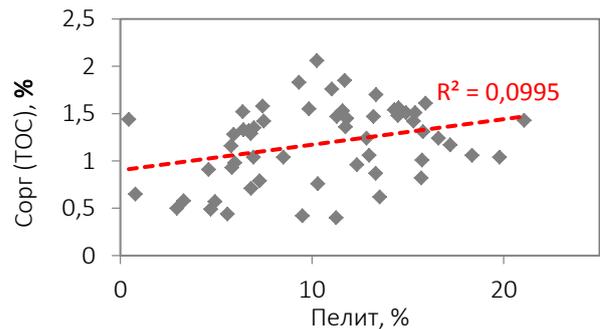


Рис. 6. Взаимосвязь параметра C_{org} и доли пелитовой фракции в осадках
Fig. 6. Correlation of TOC and the fraction of clay particles in surface sediments

Результаты пиролитического анализа показали, что определяющую роль в формировании состава C_{org} донных осадков Чаунской губы играют первичная продуктивность вод и процессы эрозии береговой зоны. Также в составе C_{org} прослеживается вклад речного стока, однако он имеет менее выраженный характер ввиду незначительного поступления речных наносов в воды исследуемого района. Приведенные выводы подтверждают возможность использования метода Rock-Eval как дополнительного геохимического индикатора при изучении особенностей состава C_{org} . Тем не менее формирование более полного представления о биогеохимическом цикле углерода в акватории Чаунской губы может быть обеспечено только за счет комплексного исследования системы «вода – донные отложения», в том числе на молекулярном и изотопном уровнях.

Заключение

По результатам пиролитического анализа было установлено, что содержание $C_{\text{орг}}$ варьируется от 0,4 до 2,06 %. В данной работе мы впервые показываем пространственную выдержанность $C_{\text{орг}}$ для донных осадков исследуемого района. $C_{\text{орг}}$ концентрируется преимущественно в центральной части Чаунской губы. Вдоль береговой зоны и на внутреннем шельфе ВСМ концентрации $C_{\text{орг}}$ снижаются. В центральной, юго-западной частях и в районе пролива Певек были зафиксированы повышенные значения ОI, что указывает на возможный вклад слабоокисленного $C_{\text{орг}}$. Сопоставление ряда индексов показало, что состав $C_{\text{орг}}$ определяется путем усиления вклада первичной продуктивности Чаунских вод, а также

поступлением терригенного $C_{\text{орг}}$ в результате береговой эрозии и незначительного речного стока. Таким образом, все вышеперечисленные факторы формируют особую биогеохимическую акваторию в Чаунской губе, где отсутствует крупный речной сток, а полузамкнутый аккумулятивный седиментационный бассейн, отделенный от ВСМ островом Айон, и слабое циркуляционное течение благоприятно воздействуют на усиление первичной биопродуктивности Чаунских вод. Немаловажную роль играют эрозионные процессы вдоль береговой зоны Чаунской губы, за счет которых происходит приток терригенного $C_{\text{орг}}$ и, соответственно, дальнейшее его окисление и минерализация.

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. Haghypour, T.I. Eglinton, J. Strauss, J.E. Vonk // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – Vol. 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. Haghypour, T.I. Eglinton, J.E. Vonk // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – Vol. 47. – P. 1–10.
3. Исследование состава органического вещества донных осадков моря Лаптевых с применением метода Rock-Eval / Е.В. Гершелис, Р.С. Кашапов, А.С. Рубан, И.А. Оберемок, А.А. Леонов, Д.В. Черных, О.В. Дударев, И.П. Семилетов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 189–198.
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. Papaqiakou, C. Guéguen, L.A. Miller, R.W. Macdonald // *Progress in Oceanography*. – 2020. – Vol. 185. – P. 1–14.
5. 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. Tumskoy, Ö. Gustafsson // *Nature Geoscience*. – 2014. – Vol. 7. – P. 64–70.
6. Sakshaug E. Primary and secondary production in the Arctic Seas // *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean* / Ed. by R. Stein, R. Macdonald. – Berlin: Springer, 2004. – P. 57–81.
7. Nitishinsky M., Anderson L.G., Hölemann J.A. Inorganic carbon and nutrient fluxes on the Arctic Shelf // *Continental Shelf Research*. – 2007. – Vol. 27. – Iss. 10–11. – P. 1584–1599.
8. Around one third of current Arctic Ocean primary production sustained by rivers and coastal erosion / J. Terhaar, R. Lauerwald, P. Regnier, N. Gruber, L. Bopp // *Nature Communications*. – 2021. – Vol. 12. – № 169. – P. 1–10.
9. Dissolved oxygen, silicon, phosphorus and suspended matter concentrations during the spring breakup of the Lena River / S. Pivovarov, J. Hölemann, H. Kassens, M. Antonow, I. Dmitrenko // *Land–Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History* / Eds. H. Kassens, H.A. Bauch, I. Dmitrenko, H. Eicken, H.-W. Hubberten, M. Melles, J. Thiede, L. Timokhov. – Berlin: Springer, 1999. – P. 251–264.
10. On carbon transport and fate in the East Siberian Arctic land–shelf–atmosphere system / I. Semiletov, N. Shakhova, V. Sergienko, I. Pipko, O. Dudarev // *Environmental Research Letters*. – 2012. – Vol. 7. – № 1. – Res. Lett. 7, 015201.
11. Bourgeois S., Archambault P., Witte U. Organic matter remineralization in marine sediments: a Pan-Arctic synthesis // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2017. – Vol. 31. – № 1. – P. 190–213.
12. 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. – Vol. 32. – P. 1–5.
13. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitation / J.R. Disnar, B. Guillet, D. Keravis, C. Di Giovanni, D. Sebag // *Organic Geochemistry*. – 2003. – Vol. 34. – P. 327–343.
14. Monitoring organic matter dynamics in soil profiles by ‘Rock Eval pyrolysis’: bulk characterization and quantification of degradation / D. Sebag, J.R. Disnar, B. Guillet, C. Di Giovanni, E.P. Verrecchia, A. Durand // *European Journal of Soil Science*. – 2006. – Vol. 57. – P. 344–355.
15. Диагенетическая трансформация органического вещества голоценовых осадков Черного моря по данным пиролиза / В.Н. Меленевский, С.В. Сараев, Е.А. Костырева, В.А. Каширцев // *Геология и геофизика*. – 2017. – Т. 58. – № 2. – С. 273–289.
16. Меленевский В.Н., Леонова Г.А., Коньшев А.С. Результаты исследования органического вещества современных осадков озера Белое (Западная Сибирь) по данным пиролитических методов // *Геология и геофизика*. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 751–762.
17. Особенности состава органического вещества донных осадков Чаунской губы (Восточно-Сибирское море) / Н.А. Полтавская, Е.В. Гершелис, И.А. Оберемок, А.А. Гринько, А.Н. Чаркин, Е.И. Ярошук, О.В. Дударев, Н.А. Смирнова, Н.В. Гусева, И.П. Семилетов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 130–146.

18. Органическое вещество донных осадков моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря: обзор результатов пиролиза / Е.В. Гершелис, А.С. Рубан, Д.В. Черных, Н.А. Полтавская, И.П. Семилетов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 149–162.
19. Carrie J., Sanei H., Stern G. Standardisation of Rock-Eval pyrolysis for the analysis of recent sediments and soils // *Organic Geochemistry*. – 2013. – Vol. 46. – P. 38–53.
20. Guidelines for Rock-Eval analysis of recent marine sediments / F. Baudin, J.-R. Disnar, A. Aboussou, F. Savignac // *Organic Geochemistry*. – 2015. – Vol. 86. – P. 71–80.
21. Shepard F.P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios // *Journal of Sedimentary Petrology*. – 1954. – Vol. 24. – P. 151–158.
22. Blott S.J., Pye K. Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2001. – Vol. 26. – P. 1237–1248.
23. 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 // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 419. – № 2. – С. 255–261.
24. Восточно-Сибирский шельф: особенности современного морфолитогеоза / О.В. Дударев, А.Н. Чаркин, И.П. Семилетов, Дж. Вонк, О. Густафсон, П. Андерсон // Геология Морей и Океанов: Материалы XVIII Международной Научной Конференции (Школы) по Морской Геологии. – М.: Институт океанологии им. Ширшова РАН, 2009. – Т. I. – С. 35–38.
25. 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. – Vol. 185. – P. 1–14.
26. Stein R., Fahl K. The Laptev Sea: distribution, sources, variability and burial of organic carbon // *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean* / Ed. by R. Stein, R.W. Macdonald. – Berlin: Springer-Verlag, 2004. – P. 213–236.
27. Quantifying degradative loss of terrigenous organic carbon in surface sediments across the Laptev and East Siberian Sea / L. Bröder, A. Andersson, T. Tesi, I. Semiletov, O. Gustafsson // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2019. – Vol. 33. – P. 85–99.
28. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia / J.E. Vonk, L. Sánchez-García, 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, Ö. Gustafsson // *Nature*. – 2012. – Vol. 489. – P. 137–140.
29. Fate of terrigenous organic matter across the Laptev Sea from the mouth of the Lena River to the deep sea of the Arctic interior / L. Bröder, T. Tesi, J.A. Salvadó, I.P. Semiletov, O.V. Dudarev, Ö. Gustafsson // *Biogeosciences*. – 2016. – Vol. 13. – P. 5003–5019.
30. 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. – Vol. 68. – P. 52–60.
31. Stein R., Macdonald R.W. *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. – Berlin, Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2004. – 363 p.
32. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: Implications for terrestrial organic carbon export / L. Guo, I. Semiletov, Ö. Gustafsson, J. Ingri, P. Andersson, O. Dudarev, D. White // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2004. – Vol. 18. – № 1. – GB1036.
33. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations / J.R. Disnar, B. Guillet, D. Keravis, C. Di-Giovanni, D. Sebag // *Organic Geochemistry*. – 2003. – Vol. 34. – P. 327–343.
34. Hayes M.H.B., Mylotte R., Swift R.S. Humins: its composition and importance in soil organic matter // *Advances in Agronomy*. – 2017. – Vol. 143. – P. 47–138.
35. Controls on the abundance, provenance and age of organic carbon buried in continental margin sediments / B. Ausin, E. Bruni, N. Haghpor, C. Welte, S.M. Bernasconi, T.I. Eglinton // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2021. – Vol. 558. – P. 116759.
36. Adsorption of organic matter on clay minerals in the South China. Dajiuhu peat soil chronosequence / H. Hong, S. Chen, Q. Fang, T.J. Algeo, L. Zhao // *Applied Clay Science*. – 2019. – Vol. 178. – P. 105125.
37. Mineralogical control on the fate of continentally derived organic matter in the ocean. / T.M. Blattmann, Z. Liu, Y. Zhang, Y. Zhao, N. Haghpor, D.B. Montluçon, M. Plötze, T.I. Eglinton // *Science*. – 2019. – Vol. 366. – P. 742–745.

Информация об авторах

Наталина Александровна Полтавская, ассистент, младший научный сотрудник отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. geoikigai@tpu.ru

Елена Владимировна Гершелис, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. elenapanova@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0854-9212>

Александр Николаевич Чаркин, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией перспективных методов морских исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. charkin@poi.dvo.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9273-9950>

Елена Игоревна Ярошук, научный сотрудник лаборатории перспективных методов морских исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. e.yaroshchuk@poi.dvo.ru

Наталья Владимировна Гусева, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель директора по научно-образовательной деятельности Инженерной школы природных ресурсов Национально-

го исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. gusevanv@tpu.ru

Игорь Петрович Семилетов, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ipsemiletov@alaska.edu; <http://orcid.org/0000-0003-1741-6734>

Поступила в редакцию: 02.10.2023

Поступила после рецензирования: 17.10.2023

Принята к публикации: 10.01.2024

REFERENCES

1. Tanski G., Bröder L., Wagner D., Knoblauch C., Lantuit H., Beer C., Sachs T., Fritz M., Tesi T., Koch B.P., Haghypour 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., Haghypour 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. Gershelis E.V., Kashapov R.S., Ruban A.S., Oberemok I.A., Leonov A.A., Chernykh D.V., Dudarev O.V., Semiletov I.P. Investigation of the composition of organic matter of bottom sediments of the Laptev Sea using the Rock-Eval method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 189–198. (In Russ.)
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. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolosky D., Tumskey V., Gustafsson Ö. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, pp. 64–70.
6. Sakshaug E., Stein R., Macdonald R. Primary and secondary production in the Arctic Seas. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Berlin, Springer, 2004. pp. 57–81.
7. Nitishinsky M., Anderson L.G., Hölemann J.A. Inorganic carbon and nutrient fluxes on the Arctic Shelf. *Continental Shelf Research*, 2007, vol. 27, pp. 1584–1599.
8. Terhaar J., Lauerwald R., Regnier P., Gruber N., Bopp L. Around one third of current Arctic Ocean primary production sustained by rivers and coastal erosion. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, pp. 1–10.
9. Pivovarov S., Hölemann J., Kassens H., Antonow M., Dmitrenko I. Dissolved oxygen, silicon, phosphorous and suspended matter concentrations during the spring breakup of the Lena River. *Land–Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History*. Eds. H. Kassens, H.A. Bauch, I. Dmitrenko, H. Eicken, H.-W. Hubberten, M. Melles, J. Thiede, L. Timokhov. Berlin, Springer, 1999. pp. 251–264.
10. Semiletov I., Shakhova N., Sergienko V., Pipko I., Dudarev O. On carbon transport and fate in the East Siberian Arctic land–shelf–atmosphere system. *Environmental Research Letters*, 2012, vol. 7, no. 1, Res. Lett. 7, 015201.
11. Bourgeois S., Archambault P., Witte U. Organic matter remineralization in marine sediments: a Pan-Arctic synthesis. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, vol. 31, no. 1, pp. 190–213.
12. 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.
13. Disnar J.R., Guillet B., Keravis D., Di Giovanni C., Sebag D. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitation. *Organic Geochemistry*, 2003, vol. 34, pp. 327–343.
14. Sebag D., Disnar J.R., Guillet B., Di Giovanni C., Verrecchia E.P., Durand A. Monitoring organic matter dynamics in soil profiles by ‘Rock Eval pyrolysis’: bulk characterization and quantification of degradation. *European Journal of Soil Science*, 2006, vol. 57, pp. 344–355.
15. Melenevskii V.N., Saraev S.V., Kostyreva E.A., Kashirtsev V.A. Diagenetic transformation of organic matter of the Holocene Black sea sediments according to pyrolysis data. *Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 273–289. (In Russ.)
16. Melenevsky V.N., Leonova G.A., Konyshov A.S. The results of the study of the organic matter of modern sediments of Lake Beloe (Western Siberia) according to pyrolytic methods. *Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 6, pp. 751–762.
17. Poltavskaya N.A., Gershelis E.V., Oberemok I.A., Grinko A.A., Charkin A.N., Yaroshchuk E.I., Smirnova N.A., Guseva N.V., Dudarev O.V., Semiletov I.P. Features of the composition of organic matter of bottom sediments of the Chaunskaya Bay (East Siberian Sea). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 130–146. (In Russ.)
18. Gershelis E.V., Ruban A.S., Chernykh D.V., Poltavskaya N.A., Semiletov I.P. Organic matter of bottom sediments of the Laptev Sea and the East Siberian Sea: a review of pyrolysis results. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 149–162. (In Russ.)
19. Carrie J., Sanei H., Stern G. Standardisation of Rock-Eval pyrolysis for the analysis of recent sediments and soils. *Organic Geochemistry*, 2013, vol. 46, pp. 38–53.
20. Baudin F., Disnar J.-R., Aboussou A., Savignac F. Guidelines for Rock-Eval analysis of recent marine sediments. *Organic Geochemistry*, 2015, vol. 86, pp. 71–80.
21. Shepard F.P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, vol. 24, pp. 151–158.

22. Blott S.J., Pye K. Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, vol. 26, pp. 1237–1248.
23. Dudarev O.V., Charkin A.N., Semiletov I.P., Shilo I.N., Salyuk A.N., Spivak E.A. About the current state of underwater island relics on the East Siberian shelf. *Reports of the Academy of Sciences*, 2008, vol. 419, no. 2, pp. 255–261. (In Russ.)
24. Dudarev O.V., Charkin A.N., Semiletov I.P., Wong J., Gustafsson O., Anderson P. Siberian shelf: features of modern morpholithogenesis. Geology of the Seas and Oceans. *Materials of the XVIII International Scientific Conference (School) on Marine Geology*. Moscow, Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009. Vol. I, pp. 35–38.
25. 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.
26. Stein R., Macdonald R.W. *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Berlin, Springer-Verlag, 2004. pp. 213–236.
27. 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.
28. Vonk J.E., Sánchez-García 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 Ö. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. *Nature*, 2012, vol. 489, pp. 137–140.
29. Bröder L., Tesi T., Salvadó J.A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Gustafsson Ö. 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, vol. 13, pp. 5003–5019.
30. 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.
31. Stein R., Macdonald R.W. *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2004. 363 p.
32. Guo L., Semiletov I., Gustafsson Ö., Ingri J., Andersson P., Dudarev O., White D. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: Implications for terrestrial organic carbon export. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, vol. 18, no. 1, GB1036.
33. 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.
34. 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.
35. Ausín 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, p. 116759.
36. Hong H., Chen S., Fang Q., Algeo T.J., Zhao L. Adsorption of organic matter on clay minerals in the Dajiuhe peat soil chronosequence, South China. *Applied Clay Science*, 2019, vol. 178, p. 105125.
37. Blattmann T.M., Liu Z., Zhang Y., Zhao Y., Haghipour N., Montluçon D.B., Plötze M., Eglinton T.I. Mineralogical control on the fate of continentally derived organic matter in the ocean. *Science*, 2019, vol. 366, pp. 742–745.

Information about the authors

Natalina A. Poltavskaya, Assistant, Junior Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. geoikigai@tpu.ru

Elena V. Gershelis, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. elenapanova@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0854-9212>

Aleksandr N. Charkin, Cand. Sc., Head of the Laboratory of Advanced Methods of Marine Research, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences, 43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. charkin@poi.dvo.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9273-9950>

Elena I. Yaroshchuk, Researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences, 43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. e.yaroshchuk@poi.dvo.ru

Natalya V. Guseva, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gusevanv@tpu.ru

Igor P. Semiletov, Corresponding Member of the RAS, Dr. Sc., Head of the Laboratory, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences, 43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ipsemiletov@alaska.edu; <http://orcid.org/0000-0003-1741-6734>

Received: 02.10.2023

Revised: 17.10.2023

Accepted: 10.01.2024