

УДК 550.47+550.42

КОНЦЕНТРАЦИЯ, ИЗОТОПНЫЙ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В СУБАКВАЛЬНЫХ ТАЛЫХ И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ГУБЫ БУОР-ХАЯ

© 2022 г. А. С. Ульяновцев¹ *, С. Ю. Братская² **, О. В. Дударев³ ***, И. П. Семилетов³¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия³Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

*e-mail: uleg85@gmail.com

**e-mail: s.bratskaya@gmail.com

***e-mail: dudarev@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 17.08.2021 г.

После доработки 16.12.2021 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

По трем скважинам, пробуренным с припайного льда в бухте Буор-Хая в 2014–2015 гг., проведен сравнительный анализ содержания и состава органического вещества (ОВ) в донных отложениях и субаквальных многолетнемерзлых породах по концентрации органического углерода ($C_{\text{орг}}$), C/N отношению и изотопному составу $C_{\text{орг}}$ ($\delta^{13}\text{C}$). Интервалы измеренных в 105 пробах значений $C_{\text{орг}}$, C/N и $\delta^{13}\text{C}$ составили от 0.04 до 23.1% (ср. 2.08%), от 1.00 до 41.7 (ср. 11.8) и от –29.1 до –19.6‰ (ср. –24.9‰) соответственно. Наибольшие концентрации $C_{\text{орг}}$ обнаружены на горизонтах, обогащенных растительным детритом. По совокупности полученных данных показано, что в исследованных отложениях и многолетнемерзлых грунтах присутствует ОВ растительного, озерного и морского генезиса. В большинстве проб оно смешанное, но обогащено компонентами континентальной растительности и озерного происхождения. По изотопному и элементному составу ОВ установлено, что в исследованных толщах присутствуют отложения едомной свиты и ледового комплекса, в меньшей степени – отложения термокарстовых водоемов и затопленных морем котловин. В относительном отдалении от континента зафиксировано изотопное утяжеление углерода в толщах, связанное с возросшей долей в ОВ компонентов гидробионтов, что подтверждается данными по молекулярному составу n-алканов. Связь между гранулометрическим составом отложений и органо-геохимическими параметрами не прослеживается, что является отличительной чертой исследованных аллювиальных толщ.

Ключевые слова: Арктика, прибрежная зона, донные отложения, подводная мерзлота, органический углерод, стабильные изотопы углерода, C/N отношение, криогенный тип, гранулометрический состав

DOI: 10.31857/S0030157422030157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения прибрежно-шельфовой зоны арктических морей России определяется современными изменениями климата в Арктике, способствующими разгрузке многолетнемерзлых толщ, термоабразии и эрозии берегов, дегазации дна, ледовой экзарации и, соответственно, необходимостью прогноза опасных природных явлений на шельфе [1, 6–8, 10, 27, 29, 34, 37–39, 45, 52, 68–70, 80]. Отличительной особенностью Восточно-Арктического шельфа является широкое распространение подводных многолетнемерзлых пород, сосредоточивших в себе значительное ко-

личество органического углерода ($C_{\text{орг}}$), способного к мобилизации и быстрой миграции [41, 44, 48, 64, 65, 73–75, 78, 83, 86, 87]. На фоне продолжающихся климатических изменений в Арктике резервуар $C_{\text{орг}}$ многолетнемерзлых толщ постепенно вовлекается в современный цикл углерода в основном за счет усиления термоэрозии и абразии берегов, увеличения речной разгрузки [35, 37–39, 49, 66, 67].

Активация многолетнемерзлого $C_{\text{орг}}$ и его климатическая роль в биогеохимических процессах в Арктике является дискуссионной и широко публикуемой темой [например, 29–33, 39, 44, 64–67,

76–77, 79–82]. Поступающий в составе осадочно-го материала $C_{орг}$ преимущественно захоранивается в донных осадках, однако часть его распространяется в толще вод на большие расстояния и вовлекается в цикл углерода, что способствует усилению acidификации водных масс и потоков CH_4 и CO_2 в системе океан–атмосфера [11, 30–32, 44, 53–55, 66, 67, 82]. Анализ концентрации и состава органического вещества (ОВ) в генетически разнообразных отложениях подводной криолитозоны для идентификации их происхождения и оценки потенциальных климатических рисков является актуальной фундаментальной задачей ввиду ограниченности данных и трудностей пробоотбора в суровых условиях Арктики. Целью работы была сравнительная характеристика концентрации, изотопного и элементного состава ОВ в генетически различных донных осадках и отложениях подводной многолетней мерзлоты из трех скважин, пробуренных в губе Буор-Хая.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследования послужили донные отложения и многолетнемерзлые грунты из трех скважин, пробуренных в марте–апреле 2014 г. и апреле 2015 г. в губе Буор-Хая [17, 18]. Скважины были пробурены с припайного льда в 2014 г. в Ивашкиной лагуне полуострова Быковский (скв. 1D-14), вблизи северного мыса о. Муостах (скв. 3D-14) и в 2015 г. севернее о. Муостах (скв. 1D-15). Для выполнения анализов пробы были высушены до постоянной массы в течение 48 ч при температуре $+60^\circ C$, измельчены на шаровой мельнице Pulverisette 7 (Fritsch, Германия) при 670 об./мин в течение 10 мин (размольные стаканы и шары выполнены из агата), просеяны и квартованы. Всего проанализировано 105 образцов.

Анализы концентрации $C_{орг}$ и C/N отношения выполнены в лаборатории органических и гибридных функциональных материалов Института химии ДВО РАН. Использован метод высокотемпературного сжигания на элементном анализаторе EuroVector-EA3000 (Италия). C/N рассчитывалось как массовое отношение концентрации $C_{орг}$ к общему азоту ($N_{общ}$). Стандартное отклонение не превышало $\pm 3\%$ от массовой концентрации C и N в сухом осадке для трех параллельных измерений при чувствительности метода 0.001%.

Анализы изотопного состава органического углерода ($\delta^{13}C$) выполнены в лаборатории стабильных изотопов Дальневосточного геологического института ДВО РАН на базе ЦКП “Приморский центр локального элементного и изотопного анализа”. Для анализа пробы были обработаны соляной кислотой (0.1 M) для удаления карбонатов. Подготовка проб к анализу проведена с использованием элементного анализато-

ра FlashEA-1112 (ThermoQuest, Германия) в конфигурации C/N по стандартному протоколу конвертирования $C_{орг}$ в CO_2 . Измерение изотопных отношений $^{13}C/^{12}C$ выполнено на масс-спектрометре MAT-253 (ThermoQuest, Германия) в режиме непрерывного потока гелия. Результаты измерений $\delta^{13}C$ приведены к международному стандарту Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB). Для калибровки аналитической системы использованы изотопные стандарты МАГАТЭ СН-6 и NBS-22. Стандартное отклонение не превышало $\pm 0.15\%$ $\delta^{13}C$ для трех параллельных измерений. Обработка результатов методом главных компонент проведена с использованием программного пакета XLSTAT Premium v.2016.02.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полуостров Быковский расположен к северо-востоку от п. Тикси и представляет собой фрагмент подгорной равнины, примыкающий к восточным склонам Хараулахского хребта и ограниченный с востока акваторией губы Буор-Хая (рис. 1). Как и большая часть побережья изучаемого региона, он сложен льдистыми породами ледового комплекса и тонкозернистыми аласными отложениями. Ивашкина лагуна представляет собой затопленную морской водой термокарстовую котловину, формирование которой началось на границе голоцена и плейстоцена [50, 56, 57], а соединение с морем произошло в середине голоцена [28]. Остров Муостах, расположенный юго-восточнее полуострова, является исчезающим останцем той же равнины и состоит преимущественно из отложений ледового комплекса позднеплейстоценового возраста [38, 59–63, 71]. Ведущая роль криогенных процессов в осадконакоплении и постгляциальной трансформации осадочных толщ (солифлюкции, таберирования) исследуемой части моря Лаптевых связана с повсеместным распространением высокольдистых отложений ледового комплекса в прибрежной зоне Северной Якутии.

Береговые отложения губы Буор-Хая, сложенные плейстоценовыми льдистыми породами ледового комплекса, окаймляют ее с востока практически целиком (п-ов Буор-Хая) и частично с юго-запада (п-ов Быковский и о. Муостах). Эти отложения представлены суглинками с высоким содержанием $C_{орг}$, представленного в основном остатками континентальной растительности, торфа, гумусом, керогеном [12, 17, 19, 24–26, 42, 59, 61]. Современная седиментация в акватории губы Буор-Хая определяется в первую очередь влиянием стока Лены и грунтовых вод, процесса абразии и термоэрозии берегов, термокарста, ледовым режимом [12, 19, 33, 37, 38, 58, 59, 61].

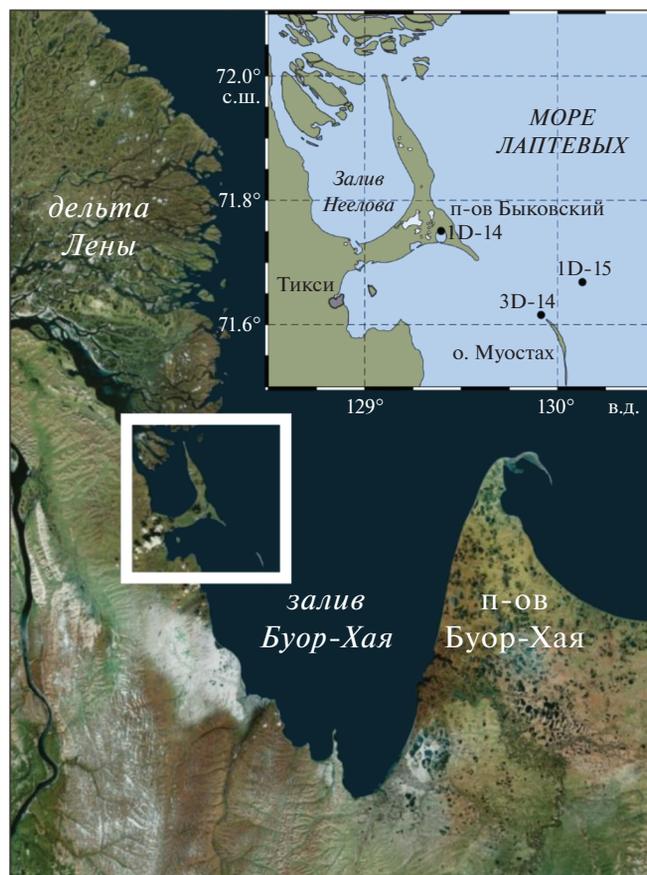


Рис. 1. Карта-схема района исследований и расположение пробуренных скважин.

В периоды ледостава ослабевает влияние речного стока и поставка осадочного вещества континентального происхождения на дно снижается. В свободное ото льда время влияние стока Лены возрастает, что отражается в интенсификации термоэрозии берегов и, соответственно, в усилении поставки терригенного материала с континента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследуемые полифациальные толщи отложений залива Буор-Хая представлены широким набором литологических и криогенных типов отложений в многолетнемерзлом, охлажденном и талом состоянии, формирование которых происходило под влиянием четвертичных колебаний климата и уровня моря, определявших разнообразие географических обстановок осадконакопления и неоднократные изменения седиментационных потоков в условиях прибрежного криолитогенеза [12, 17–19, 23, 24, 40, 51]. В составе этих толщ доминируют разнозернистые кварц-полевошпатовые аллювиальные пески, в виде отдельных включений и слоев встречаются остатки наземной растительности (древесина, мхи), почвы,

торф, зерна керогена, рассеянный гравийно-галечный материал и отдельные слои окатанной гальки. Эти песчаные отложения отражают плейстоцен-плиоценовую историю формирования буорхайнской свиты [12], толщи которой были затоплены в результате среднеголоценового постгляциального повышения уровня моря [28]. Литологическая характеристика и гранулометрический состав исследованных в настоящей работе отложений и мерзлых грунтов подробно рассмотрены в [17, 18] соответственно.

Проанализированные отложения характеризуются значительной вариабельностью $C_{\text{орг}}$ (от 0.04 до 23.1%), C/N (от 1.0 до 42) и $\delta^{13}C$ (от -29.1 до -19.6‰), что отражает пульсирующий характер накопления различного по составу, концентрации и зрелости ОВ (табл. 1–3). Анализ частоты встречаемости выявил характерные диапазоны измеренных $C_{\text{орг}}$, C/N и $\delta^{13}C$ (рис. 2). Более половины проанализированных проб характеризуется концентрациями $C_{\text{орг}}$ более 1%. Единичные горизонты скважин 1D-14 и 1D-15 содержат более 5% $C_{\text{орг}}$, и характеризуются значениями $C/N > 15$. Максимумы C/N в большинстве случаев коррелируют с содержанием в пробах растительных

Таблица 1. Литологическое описание и величины измеренных органо-геохимических параметров отложений из скважины 1D-14

Горизонт, см	Описание	Криогенное состояние	C _{орг} , %	C/N	δ ¹³ C, ‰
0	Алеврито-пелитовый ил с примесью песка	Талое	2.74	7.84	-25.0
55	Песок алевритовый	Талое	0.94	5.87	-22.3
96	Пелит песчанисто-алевритовый	Талое	4.64	11.3	-22.3
190	Песок алевритовый	Талое	1.09	6.39	-21.9
296	Песок пелитово-алевритовый	Талое	2.11	9.19	-22.3
415	Алеврит песчанисто-пелитовый	Талое	1.83	8.73	-22.3
448	Алеврит песчанисто-пелитовый	Талое	1.42	7.91	-21.9
496	Песок пелитово-алевритовый	Талое	1.24	6.88	-24.4
546	Песок пелитово-алевритовый	Талое	1.57	8.25	-25.1
878	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.90	3.59	-26.2
1039	Песок пелитово-алевритовый	Талое	1.56	22.3	-22.9
1070	Ферментированный мох	Талое	12.3	25.5	-27.0
1120	Ферментированный мох	Талое	19.4	19.8	-27.4
1142	Песок	Талое	3.46	13.3	-25.5
1200	Песок пелитово-алевритовый	Мерзлое	5.62	19.4	-26.4
1218	Песок пелитово-алевритовый	Мерзлое	0.97	8.78	-26.0
1358	Песок пелитово-алевритовый	Мерзлое	1.30	9.27	-25.4
1391	Песок	Мерзлое	0.56	27.8	-26.3
1471	Песок	Мерзлое	0.52	25.8	-25.5
1486	Алеврит песчанисто-пелитовый	Мерзлое	1.89	31.5	-26.4
1631	Алеврит песчанисто-пелитовый	Мерзлое	2.49	19.1	-26.2
1706	Песок алевритово-пелитовый	Мерзлое	23.1	27.2	-27.5
1743	Песок пелитовый	Мерзлое	3.75	11.0	-26.9
1796	Песок пелитовый	Мерзлое	0.90	30.0	-25.8
1901	Песок	Мерзлое	1.86	14.3	-25.0
1914	Песок	Мерзлое	1.33	26.5	-26.3
2059	Алеврит пелитовый	Мерзлое	2.26	32.3	-26.6
2087	Песок алевритовый	Мерзлое	2.49	22.7	-27.4
2119	Песок алевритовый	Мерзлое	5.64	19.5	-24.4
2366	Песок	Мерзлое	0.51	5.69	-21.4
2460	Песок	Мерзлое	0.34	5.64	-27.8
2701	Песок	Мерзлое	0.25	12.3	-29.1
3154	Песок алевритовый	Мерзлое	4.02	30.9	-26.3
3313	Песок	Мерзлое	0.36	18.1	-28.3
3447	Песок	Мерзлое	4.07	37.0	-26.9
3597	Песок алевритовый	Мерзлое	2.07	15.9	-22.7
3745	Песок алевритовый	Мерзлое	0.31	10.2	-27.3
3782	Алеврит песчанисто-пелитовый	Мерзлое	1.23	12.3	-23.9
	Минимум		0.25	3.59	-29.1
	Медиана		1.70	13.8	-25.9
	Среднее		3.24	16.6	-25.3
	Максимум		23.1	37.0	-21.4

Таблица 2. Литологическое описание и величины измеренных органо-геохимических параметров отложений из скважины 3D-14

Горизонт, см	Описание	Криогенное состояние	C _{орг} , %	C/N	δ ¹³ C, ‰
10	Песок	Талое	1.29	3.69	-24.7
155	Песок пелитово-алевритовый	Талое	2.01	13.4	-25.6
310	Песок алевритовый	Талое	1.47	4.21	-25.5
402	Песок пелитово-алевритовый	Талое	2.00	5.88	-26.4
422	Песок пелитово-алевритовый	Талое	2.17	6.19	-26.3
845	Песок пелитово-алевритовый	Талое	1.05	4.04	-24.6
896	Песок пелитово-алевритовый	Талое	1.51	4.19	-26.4
1057	Алеврит песчаный	Мерзлое	1.43	5.73	-25.2
1080	Алеврит песчаный	Мерзлое	2.20	6.48	-25.0
1170	Алеврит песчаный	Мерзлое	0.99	9.88	-26.1
1249	Алеврит песчаный	Мерзлое	0.99	6.19	-25.8
1334	Алеврит песчаный	Мерзлое	1.02	4.44	-25.0
1414	Алеврит песчаный	Мерзлое	0.95	2.88	-25.1
1450	Алеврит песчаный	Мерзлое	1.71	4.75	-25.2
1471	Песок алевритово-пелитовый	Мерзлое	1.81	4.65	-24.8
1475	Песок алевритово-пелитовый	Мерзлое	1.47	4.74	-24.0
1499	Песок пелитово-алевритовый	Мерзлое	0.95	10.5	-24.6
1540	Песок пелитово-алевритовый	Мерзлое	1.20	7.49	-26.0
1740	Песок пелитово-алевритовый	Мерзлое	2.33	5.97	-27.7
	Минимум		0.95	2.88	-27.7
	Медиана		1.47	5.73	-25.2
	Среднее		1.50	6.07	-25.5
	Максимум		2.33	13.4	-24.0

остатков, вносящих значительный вклад в C_{орг}. Подавляющее большинство проанализированных образцов характеризуется δ¹³C < -24‰. Средняя величина C_{орг} и C/N буровых профилей 1D-14 и 1D-15 значительно превышает медианные значения, что связано с повышенными концентрациями ОВ в ряде горизонтов, обогащенных остатками растительности, торфа и почв. Для отложений из скважины 3D-14 медианная и средняя величины C_{орг} и C/N практически совпадают, что отражает умеренную динамику поступления и захоронения ОВ в толщах осадков близ северной оконечности о. Муостях.

Донные отложения и мерзлые породы Ивашкиной лагуны (1D-14), обогащенные древесными и травянистыми остатками, отличаются высокой вариабельностью C_{орг} (0.25–23.1%). Профили 3D-14 и 1D-15 характеризуются меньшими колебаниями C_{орг} (0.95–2.33% и 0.04–15.2% соответственно), что отражает затухание на сравнительно небольшом расстоянии поступления в толщи растительных остатков с континента, определяющих основной вклад в общий пул C_{орг}. Интервалы C/N отношения и δ¹³C в отложениях скважин

1D-14, 3D-14 и 1D-15 составили 3.6–37; 2.9–13; 1.0–42 и от -29.1 до -21.4‰; от -27.7 до -24.0‰; от -27.8 до -19.6‰ соответственно, что отражает динамичную изменчивость аллохтонных и автохтонных потоков ОВ различной степени зрелости в губе Буор-Хая. Изотопный состав C_{орг} профилей 1D-14 и 3D-14 характеризуется близкими средними значениями δ¹³C (-25.3 и -25.5‰ соответственно), тогда как средняя величина δ¹³C отложений 1D-15 на 1‰ выше (-24.3‰). Между тальными и мерзлыми отложениями также обнаружена разница в средних величинах и диапазонах измеренных органо-геохимических параметров. Так, мерзлые отложения отличаются от тальных более высокими средними C_{орг} (2.36% против 1.94%) и C/N (15.2 против 10.0), а также более легким изотопным составом углерода (δ¹³C -25.8‰ против -24.4‰). Наблюдаемая разница связана с хорошей сохранностью диагенетически "свежего" ОВ в многолетнемерзлых толщах и активацией процессов микробного потребления углерода в тальных отложениях, а также с пространственной неоднородностью качественных и количественных потоков ОВ, что продемонстрировано на примере отложений скв. 1D-15 [22].

Таблица 3. Литологическое описание и величины измеренных органо-геохимических параметров отложений из скважины 1D-15

Горизонт, см	Описание	Криогенное состояние	C _{орг} , %	C/N	δ ¹³ C, ‰
0	Пелитово-алевритовый ил	Талое	2.06	7.97	-24.7
110	Алеврит пелитовый	Талое	1.98	14.9	-23.8
210	Песок пелитово-алевритовый	Талое	1.26	13.9	-26.2
280	Алеврит пелитовый	Талое	1.71	13.7	-24.0
321	Алеврит пелитовый	Талое	1.98	7.97	-23.8
395	Алеврит пелитовый	Талое	1.92	14.8	-24.0
510	Алеврит пелитовый	Талое	1.16	12.0	-22.4
612	Алеврит песчанисто-пелитовый	Талое	1.39	12.7	-22.2
675	Алеврит песчанисто-пелитовый	Талое	0.87	5.68	-21.5
750	Алеврит песчанисто-пелитовый	Талое	2.68	6.07	-25.0
794	Алеврит песчанисто-пелитовый	Талое	2.36	7.32	-25.4
852	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.58	3.33	-19.6
1114	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.29	7.53	-25.1
1195	Алеврит песчанисто-пелитовый	Талое	1.27	8.91	-24.0
1249	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.60	5.93	-23.3
1284	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.22	1.73	-23.8
1347	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.31	3.48	-24.0
1424	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.26	3.13	-27.8
1483	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.33	9.07	-23.0
1507	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.47	4.72	-24.5
1548	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.08	1.00	-24.9
1624	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.27	13.3	-22.4
1662	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.35	7.27	-24.2
1697	Песок	Талое	0.92	12.3	-24.0
1726	Песок	Талое	0.08	1.01	-24.7
1800	Песок	Талое	0.64	15.5	-24.7
1930	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.54	6.70	-24.3
2031	Песок	Талое	0.53	8.98	-25.2
2093	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.66	2.68	-24.1
2170	Песок	Талое	0.65	6.33	-24.1
2210	Песок	Талое	0.98	9.11	-25.3
2221	Песок	Талое	6.26	31.2	-26.3
2254	Песок	Талое	0.75	7.44	-24.5
2321	Песок	Талое	0.60	3.18	-24.1
2402	Песок	Талое	0.56	7.53	-24.6
2469	Песок	Талое	0.29	15.9	-25.0
2545	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.24	2.28	-25.1
2604	Песок	Талое	0.42	23.2	-25.1
2648	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.49	9.54	-25.6
2670	Песок пелитово-алевритовый	Талое	6.21	41.7	-26.3
2712	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.25	2.54	-24.9
2780	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.79	21.4	-24.7
2929	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.20	13.5	-25.9
3120	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.06	2.78	-22.4
3146	Песок пелитово-алевритовый	Талое	15.2	35.4	-25.1
3200	Песок пелитово-алевритовый	Талое	4.77	20.7	-26.2
3248	Песок пелитово-алевритовый	Талое	0.04	1.00	-22.0
3304	Песок	Талое	0.60	5.66	-24.6
	Минимум		0.04	1.00	-27.8
	Медиана		0.60	7.75	-24.5
	Среднее		1.40	10.3	-24.3
	Максимум		15.2	41.7	-19.6

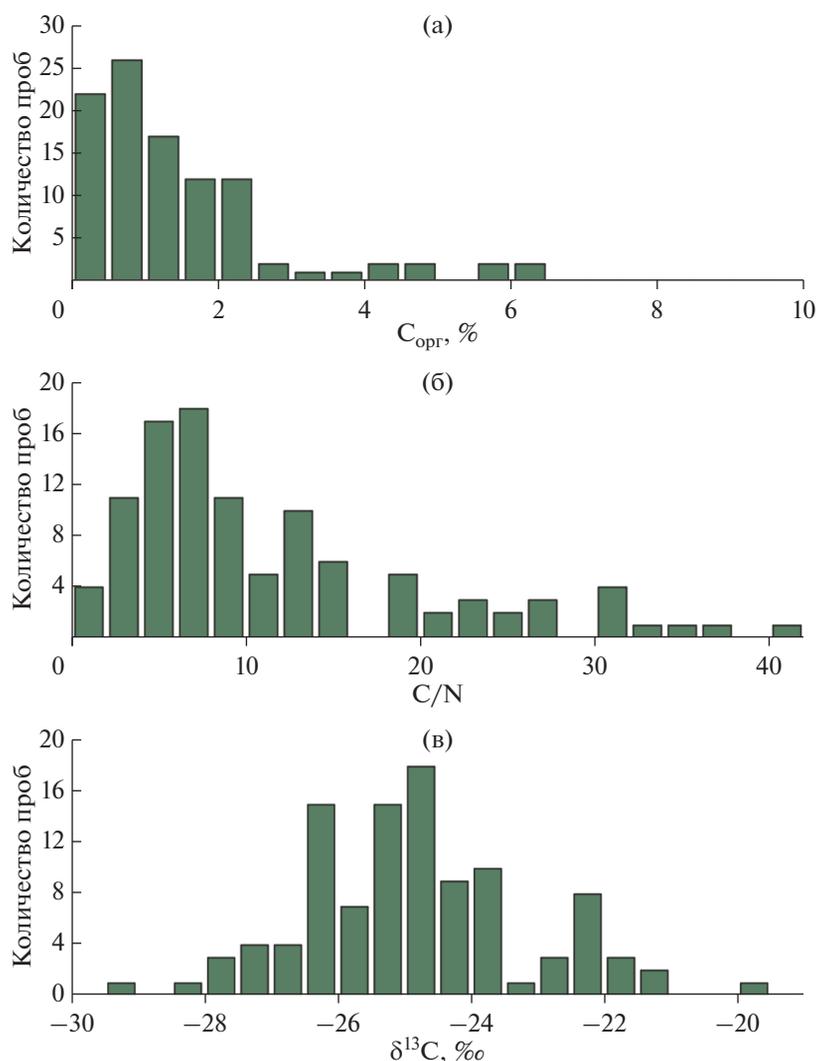


Рис. 2. Диаграммы частоты встречаемости значений $C_{\text{орг}}$ (а), C/N (б) и $\delta^{13}\text{C}$ в исследованных образцах. Значения $C_{\text{орг}} > 10\%$ измерены в пробах скважин 1D-14 (горизонты 1070, 1120 и 1706 см) и 1D-15 (горизонт 3146 м).

ОБСУЖДЕНИЕ

Высокая концентрация $C_{\text{орг}}$ в отложениях скв. 1D-14 и 1D-15 связана с присутствием большого количества растительных остатков в виде отдельных включений, прослоев и мощных слоев. Верхняя пачка отложений 1D-15 отличается повышенной ($> 1\%$) концентрацией $C_{\text{орг}}$ по сравнению с нижележащими горизонтами, что отражает усиление в верхнем голоцене потоков ОВ с континента. Концентрации $C_{\text{орг}}$ в бесструктурных песчаных толщах наименьшие и отражают поступление бедного органикой осадочного материала. Профиль 3D-14 наименее вариабелен по концентрации $C_{\text{орг}}$, C/N и $\delta^{13}\text{C}$, что подтверждено незначительной разницей между их средними и медианными значениями. Он характеризуется незначительным присутствием растительного материала, накопление которого происходило при более консервативном характере осадконакопления.

В ряде горизонтов 1D-14 и 1D-15 зафиксированы высокие (> 20) значения C/N отношения, которые сопряжены с присутствием в осадках растительного детрита, торфа и почв. В большинстве случаев на этих горизонтах отмечаются максимальные концентрации $C_{\text{орг}}$ (4–23%) и облегченный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$ от -26 до -27.5‰), что указывает на захоронение в толщах больших количеств недеградированного ОВ растительного происхождения. Этот вывод был подтвержден данными по молекулярному составу фенолов лигнина [24] и n-алканов [14, 22, 23], однако следует отметить, что аналитический сигнал $\delta^{13}\text{C}$ нетрансформированного растительного ОВ в мерзлых отложениях криолитозоны Арктического региона обычно лежит в пределах от -29 до -27‰ [58, 81, 82, 85]. В случае исследованных отложений наблюдаемый сдвиг $\delta^{13}\text{C}$ в сторону утяжеления углерода относительно вышеуказанного ана-

литического диапазона, скорее всего, связан с различным соотношением потоков ОБ аллохтонного и автохтонного генезиса, что продемонстрировано на примере молекулярного состава и концентрации *n*-алканов [22, 23]. Активация процессов биохимического потребления C_{org} бактериями в оттаивающих под действием морской воды толщах [20, 21] отражается на молекулярном составе ОБ [16], а также приводит к селективному потреблению ^{12}C и накоплению изотопов ^{13}C , что отражается на величине $\delta^{13}C$ [2, 5].

Что касается низких значений *C/N* отношения, то для бедных органикой проб рассчитанные *C/N* могут быть неадекватны в связи с аналитической погрешностью измерений. Тем не менее, величины *C/N* < 2 встречаются в отложениях ледового комплекса и перетолженного осадочного материала в Арктике [60, 75], что является специфичным признаком отдельных криогенных типов отложений. Напротив, высокие значения *C/N*, которые в подобных отложениях могут достигать 50 и выше [4, 9], связаны с высокой степенью оторфованности исследованных толщ и маркируют вклад терригенного нетрансформированного ОБ. Отношение *C/N* отражает не только генезис ОБ в осадочных толщах, но и является важным индикатором его трансформации. При высоких *C/N* происходит иммобилизация азота, и деградация ОБ идет по пути окисления углерода до CO_2 [3, 46], повышенной эмиссии которого была зафиксирована ранее в исследуемом районе моря Лаптевых [80, 82]. По мере трансформации ОБ в почвенных слоях обогащается азотом, что, в конечном счете, приводит к уменьшению *C/N* отношения.

Парное соотношение *C/N* и $\delta^{13}C$ используется в химии для установления генезиса ОБ, а также идентификации криогенного типа отложений [43, 59]. На основе анализа множества различных криогенных типов отложений Арктики авторами [43] по характерным диапазонам величин *C/N* и $\delta^{13}C$ были статистически разделены отложения едомной свиты, термокарстовых озер (аласов) и затопленных котловин. В случае исследованных нами донных отложений и многолетнемерзлых пород однозначно идентифицировать криогенный тип осадков по этой диаграмме затруднительно (рис. 3). Лишь несколько горизонтов из скважин 1D-14 и 1D-15 попадают в области, соответствующие термокарстовым озерам и котловинам. В область едомной свиты попадает больше горизонтов, однако подавляющее большинство проанализированных проб выпадает из аналитических областей на диаграммы *C/N*– $\delta^{13}C$. Это является следствием выраженного полигенного характера ОБ и различной степени его зрелости в перигляциальных толщах губы Буор-Хая, содержащих большие количества остатков наземной

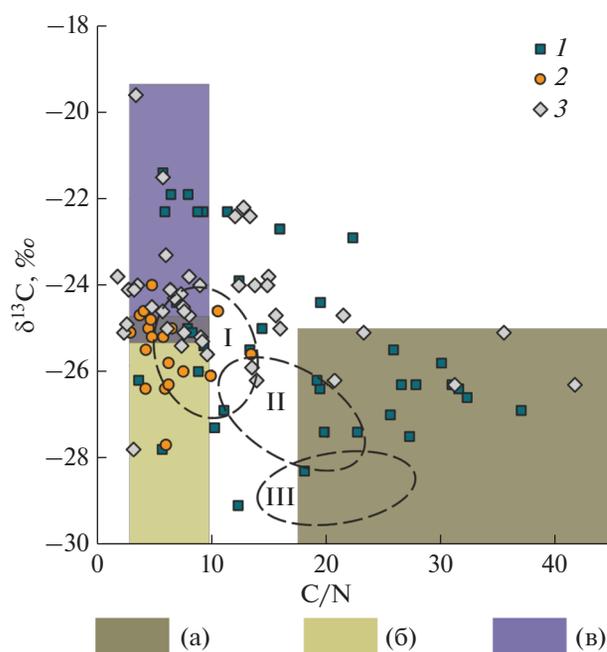


Рис. 3. Парное соотношение измеренных в пробах отложений значений *C/N* и $\delta^{13}C$. Цветом выделены области диаграммы, соответствующие генетическим типам ОБ (по [59]). Пунктирной линией выделены области диаграммы, соответствующие криогенным типам отложений (по [43]). Пробы скважин: (1) 1D-14; (2) 3D-14; (3) 1D-15. (а) – ОБ континентальной растительности (С3-фотосинтез); (б) – ОБ озерного происхождения; (в) – ОБ морского происхождения. I – отложения едомной свиты; II – отложения затопленных морем котловин; III – отложения термокарстовых озер.

растительности, торфа и керогена. Подобная картина может быть вызвана также постгляциальной трансформацией толщ, последующим перераспределением и смешиванием ОБ. Например, присутствие в толщах скв. 1D-14 и 3D-14 таберальных образований, утративших начальную текстуру и физические свойства, также оказывает влияние на сдвиг аналитического сигнала *C/N* и $\delta^{13}C$.

Обработка данных методом главных компонент позволила оценить связь измеренных геохимических параметров с гранулометрическим составом исследованных отложений. В обработку были взяты C_{org} , *C/N*, $\delta^{13}C$ и массовая доля (в %) гранулометрических фракций: песка (>63 мкм), крупного (10–63 мкм) и тонкого (2–10 мкм) алеврита, пелита (< 2 мкм). Результаты гранулометрического анализа взяты из [18]. Первые две главных компоненты объясняют 76.2% варируемости значений органо-химических и гранулометрических параметров (рис. 4). Первая главная компонента (PC1) объясняет 52.6% варируемости, и максимальные значения нагрузок здесь наблюдаются для процентного содержания гранулометрических фракций. Вторая компонента PC2 объ-

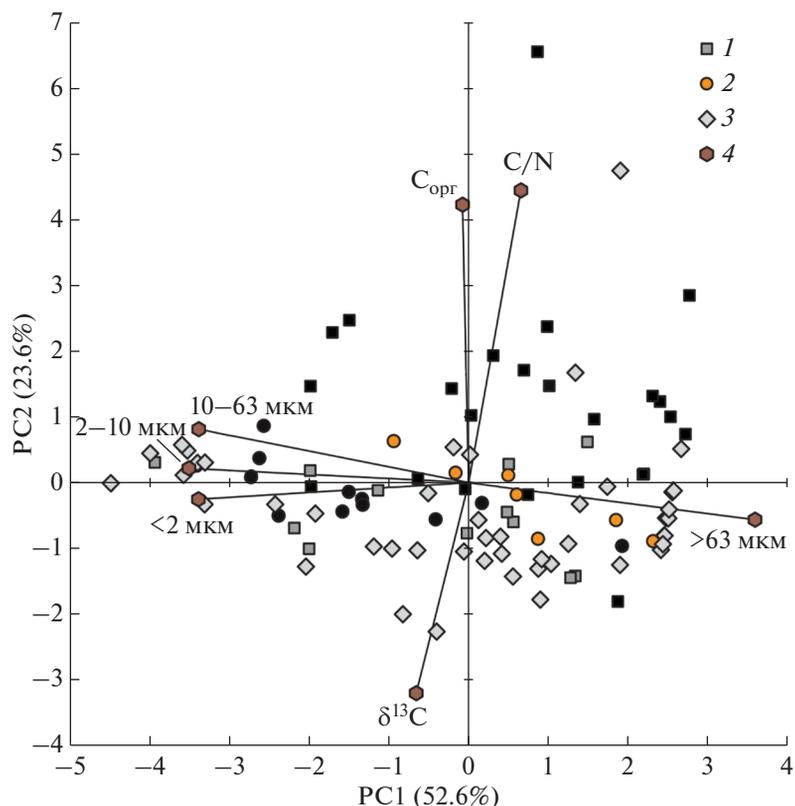


Рис. 4. Парная диаграмма главных компонент органо-геохимических и гранулометрических параметров исследованных отложений. Пробы скважин: (1) 1D-14; (2) 3D-14; (3) 1D-15. (4) Характеристики отложений (нагрузки). Черным цветом обозначены образцы мерзлых пород.

ясняет 23.6% вариабельности по концентрации $C_{\text{орг}}$ и C/N . Третья главная компонента (PC3), в свою очередь, объясняет 11.6% вариабельности, и наибольшее значение нагрузки соответствует $\delta^{13}\text{C}$.

Нагрузки, соответствующие процентному содержанию пелита и алеврита в отложениях, расположены диаметрально противоположно пескам, что подтверждает обломочную природу тонкодисперсного осадочного материала в исследованных толщах. В свою очередь антагонизм пары $C_{\text{орг}}$ и C/N с $\delta^{13}\text{C}$ подтверждает обогащение исследованных в заливе Буор-Хая толщ нетрансформированным ОВ терригенного генезиса. С ростом $C_{\text{орг}}$ в осадках наблюдается рост C/N отношения и изотопное облегчение $C_{\text{орг}}$, отражающие его терригенное происхождение и низкую степень биodeградации. Следует обратить внимание на крестообразное расположение относительно друг друга нагрузок органо-геохимических и гранулометрических характеристик. Такая картина определенно указывает на отсутствие связи ОВ—размер частиц, характерной для осадконакопления в зонах смещения река—море. Точки, соответствующие проанализированным пробам (счета), расположились на диаграмме весьма хаотично, что не позволяет выделить отдельные группы. Мож-

но отметить, что отложения профилей 1D-14 и 1D-15 более обогащены $C_{\text{орг}}$ и песком, тогда как образцы 3D-14 содержат в основном среднedisперсный материал с умеренным содержанием ОВ. Также следует отметить характерное тяготение мерзлых горизонтов к точкам $C_{\text{орг}}$ и C/N и отдаление от $\delta^{13}\text{C}$. Выше уже было отмечено, что образцы многолетнемерзлых пород по сравнению с оттаявшими толщами характеризуются повышенными средними $C_{\text{орг}}$ и C/N и пониженным $\delta^{13}\text{C}$, т.е. они более обогащены нетрансформированным ОВ терригенного генезиса.

Характерная для современной седиментации в арктических морях тенденция роста концентрации $C_{\text{орг}}$ с увеличением доли тонкодисперсных частиц [например, 13, 33, 44, 72] в исследованных отложениях не прослеживается, и это происходит по ряду причин. Во-первых, обогащение исследованных отложений $C_{\text{орг}}$ в значительной степени связано с захоронением растительных остатков и фрагментов субаэральных травянистых ландшафтов. При этом растительный детрит не учитывается при гранулометрическом анализе, а доля терригенного ОВ в исследованных отложениях многократно превышает вклад автохтонного, что

характерно для позднечетвертичного и современного осадконакопления в рассматриваемом районе и Арктике в целом [1, 12, 13, 15, 33, 36, 44, 58–63, 72, 75]. Во-вторых, при столь выраженной смене седиментационных потоков, механизмов седиментации и полигенном характере исследованных отложений, сформированных в основном за счет аллювиального выноса, криолитогеनेза и постгляциальной трансформации толщ, осадконакопление в исследуемом районе отличалось заметными колебаниями скоростей вплоть до появления локальных перерывов. Таким образом, осадконакопление в исследованном районе губы Буор-Хая, находящимся под влиянием пульсирующего поступления терригенного вещества речного и термоабразионного происхождения, характеризуется особым типом связи (отсутствием корреляции) между концентрацией $C_{орг}$ и гранулометрических фракций отложений.

В целом, измеренные концентрации $C_{орг}$ и C/N характерны для отложений арктической едомной свиты и ледового комплекса, которые формировались в условиях позднечетвертичных колебаний климата [59, 73–75, 85]. Присутствие древесных и травянистых остатков увеличивают концентрацию $C_{орг}$ в осадках до > 5%, в отдельных случаях до > 10%. В зонах насыщения растительным детритом C/N отношение также высокое (> 15) и отражает вклад недеградированной органики континентального генезиса (остатки наземной растительности, почв, торфа). Учитывая распространенность обогащенных растительным детритом слоев и прослоев, содержание $C_{орг}$ в исследованных толщах осадков залива Буор-Хая весьма значительно. По сравнению с современными донными осадками моря Лаптевых, накопление которых в голоцене происходило в субаквальных условиях, концентрация $C_{орг}$ и величина C/N в исследованных полифациальных толщах выше и варьируются в гораздо большем диапазоне [1, 13, 15, 47, 72, 84]. По составу стабильных изотопов углерода ОВ донных отложений и многолетнемерзлых пород исследованных скважин имеет терригенный и смешанный генезис. Диапазон измеренных $\delta^{13}C-C_{орг}$ согласуется с [12, 32, 33, 44, 58, 76, 82], и лишь единичные горизонты характеризуются величиной $\delta^{13}C < -22\text{‰}$, что отражает преобладающий вклад аквагенного ОВ и/или поступление сильно трансформированных бактериями органических компонентов.

Зафиксированное в результате исследования изотопное утяжеление $C_{орг}$ талых отложений по сравнению с многолетнемерзлыми, вероятно, указывает на то, что деградация ОВ в протаявших толщах происходит в современный период. В условиях продолжающегося талассогенного таяния подводной мерзлоты в Арктике активация этого механизма регуляции цикла углерода может

привести к сдвигу в сторону образования в зависимости от внешних условий ключевых углеродсодержащих газовых компонентов – CO_2 и CH_4 , повышенная миграция которых была зафиксирована ранее в исследованном районе [67–69, 82]. Обогащение исследованных толщ песками при этом обеспечивает высокую доступность ОВ для микроорганизмов [85]. Учитывая повышенную бактериальную активность в протаявших толщах отложений [58], постепенная деградация ОВ над кровлей подводной мерзлоты сопровождается продуцированием углеродсодержащих газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования установлено, что основной вклад в общий пул $C_{орг}$ в донных отложениях и подводных многолетнемерзлых грунтах залива Буор-Хая вносит терригенное, диагенетически непреобразованное ОВ континентального происхождения, представленное растительным детритом, почвами, торфом. Субаквальные реликтовые толщи многолетней мерзлоты обогащены терригенным ОВ, поступавшим с аллювиальными потоками, тогда как более современные отложения представлены продуктами береговой абразии и термоэрозии, усиление которых началось в конце позднего плейстоцена. Установленная неоднородность распределения органо-геохимических параметров в исследованных толщах, отсутствие связи между $C_{орг}$ и гранулометрическим составом отложений подтвердило выраженные колебания режима осадконакопления и широкое разнообразие механизмов седиментации. При этом характер распределения по глубине толщ $C_{орг}$, C/N и $\delta^{13}C$ отражает преимущественно континентальный режим осадконакопления.

Статистический анализ полученных данных выявил взаимосвязь между органо-геохимическими индикаторами. С ростом концентрации $C_{орг}$ наблюдается возрастание C/N и изотопное облегчение $C_{орг}$, что подтверждает обогащение исследованных толщ ОВ терригенного генезиса независимо от их литологического состава и криогенного типа. При этом многолетнемерзлые толщи отличаются большим по сравнению с талыми отложениями вкладом терригенного ОВ, поступление и захоронение которого в исследованных перигляциальных толщах происходило в значительно изменявшихся обстановках прибрежного арктического морфолитогеनेза и определялось динамикой потоков с континента.

Под влиянием поступления большого количества древесных остатков, выявленного разнообразия обстановок морфолитогеनेза, литологических и криогенных типов отложений, соотношение которых быстро изменялось во времени и на коротких расстояниях, сформировалась субак-

вальная толща континентальных отложений, обогащенных реакционно способным ОВ, для которых характерно отсутствие корреляции ОВ—размерность частиц. Такие обстановки формирования прибрежных толщ отложений на шельфе Арктики заслуживают углубленного изучения в аспекте оценки инженерных характеристик грунтов, газовой эмиссии, разгрузки грунтовых вод и миграции флюидов при таянии подводной мерзлоты.

Источники финансирования. Анализы стабильных изотопов углерода выполнены при поддержке РНФ (проект № 19-77-10044). Обобщение результатов выполнено в рамках Госзадания ИО РАН (тема № 0128-2021-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е. и др. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. 192 с.
2. Иванов М.В., Леин А.Ю., Захарова Е.Е. и др. Изотопный состав углерода органического вещества взвеси и донных осадков морей Восточной Арктики // Микробиология. 2012. Т. 81. № 5. С. 645–655.
3. Квиткина А.К. Разложение глюкозы, целлюлозы и лигнина в минеральном субстрате в зависимости от соотношения C/N // Материалы VI съезда общества почвоведов им. В. В. Докучаева (Петрозаводск-Москва, 13–18 августа 2012). М.: 2012. С. 137–139.
4. Ковда В. А., Розанов Б. Г. Почвоведение. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.
5. Леин А.Ю., Кравчишина М.Д., Политова Н.В. и др. Трансформация взвешенного органического вещества на границе вода—дно в морях Российской Арктики (по изотопным и радиоизотопным данным) // Литология и полезные ископаемые. 2012. № 2. С. 115–145.
6. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Дмитриевский Н.Н. и др. О процессах газовой выделения и деградации подводных многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 312–320.
7. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Шахова Н.Е. и др. О механизмах деградации подводных многолетнемерзлых пород на восточном арктическом шельфе России // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 2. С. 185–188.
8. Никифоров С.Л., Лобковский Л.И., Дмитриевский Н.Н. и др. Ожидаемые геолого-геоморфологические риски по трассе Северного морского пути // Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 2. С. 218–220.
9. Новиков А.А., Кисаров О.П. Обоснование роли корневых и пожнивных остатков в агроценозах // Научный журнал КубГАУ. 2012. Т. 78. № 4. С. 1–10.
10. Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О., Типенко Г.С. и др. Углеводородные газы и криолитозона шельфа Арктики // Арктика: экология и экономика. 2015. Т. 18. № 2. С. 35–44.
11. Пипко И.И., Пугач С.П., Савичев О.Г. и др. Динамика растворенного неорганического углерода и потоков CO₂ между водой и атмосферой в главном русле реки Обь // Докл. РАН. 2019. Т. 484. № 6. С. 691–697.
12. Погодаева Т.В., Ходжер Т.В., Жученко Н.А. и др. Поступление органического вещества в залив Буор-Хая (море Лаптевых) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 5. С. 739–752.
13. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в Арктических морях. М.: Наука, 2001. 302 с.
14. Романкевич Е.А., Ветров А.А., Беляев Н.А. и др. Алканы в четвертичных отложениях моря Лаптевых // Докл. РАН. 2017. Т. 472. № 1. С. 72–75.
15. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Кассенс Х. и др. М.: Изд-во МГУ, 2009. 608 с.
16. Ульянцев А.С., Беляев Н.А., Братская С.Ю., Романкевич Е.А. Молекулярный состав лигнина как индикатор таяния подводных многолетнемерзлых отложений // Докл. РАН. 2018. Т. 482. № 6. С. 701–704.
17. Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Дударев О.В. и др. Литолого-геохимическая характеристика морфолитогенеза в губе Буор-Хая // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 407–417.
18. Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Привар Ю.О. Гранулометрические характеристики донных отложений губы Буор-Хая // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 452–465.
19. Ульянцев А.С., Лобковский Л.И., Жаворонков А.В. и др. Проблемы изучения Арктического шельфа: опыт системных геолого-геохимических исследований в море Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 1016–1022.
20. Ульянцев А.С., Полякова Н.В., Братская С.Ю. и др. Таяние подводных многолетнемерзлых отложений как фактор изменения их элементного состава // Докл. РАН. 2018. Т. 483. № 3. С. 326–330.
21. Ульянцев А.С., Полякова Н.В., Романкевич Е.А. и др. Ионный состав поровой воды мелководных шельфовых моря Лаптевых // Докл. РАН. 2016. Т. 467. № 3. С. 329–335.
22. Ульянцев А.С., Прокуда Н.А., Стрельцова Е.А. и др. Геохимическая типизация органического вещества донных отложений по молекулярному составу предельных алифатических углеводородов // Океанология. 2021. Т. 61. № 5. С. 822–830.
23. Ульянцев А.С., Романкевич Е.А., Братская С.Ю. и др. Характеристика четвертичного осадконакопления на шельфе моря Лаптевых по молекулярному составу n-алканов // Докл. РАН. 2017. Т. 473. № 5. С. 600–604.
24. Ульянцев А.С., Романкевич Е.А., Пересыткин В.И. и др. Лигнин как индикатор среды осадконакопления на Арктическом шельфе // Докл. РАН. 2016. Т. 467. № 1. С. 75–80.
25. Холодов А.Л., Золотарева Б.Н., Ширинова Л.Т. Органическое вещество в основных мерзлотно-генетических типах четвертичных отложений полуострова Быковский: содержание и групповой состав гумуса // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 4. С. 29–34.
26. Чеверев В.Г., Видяпин И.Ю., Тумской В.Е. Состав и свойства отложений термокарстовых лагун Быковского полуострова // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 3. С. 44–50.

27. *Batchelor C.L., Dowdeswell J.A.* Ice-sheet grounding-zone wedges (GZWs) on high-latitude continental margins // *Marine Geology*. 2015. V. 363. P. 65–92.
28. *Bauch H.A., Kassens H., Naidina O.D.* Composition and flux of Holocene sediments on the eastern Laptev Sea shelf, Arctic Siberia // *Quaternary Research*. 2001. V. 55(3). P. 344–351.
29. *Bröder L., Andersson A., Tesi T. et al.* Quantifying Degradative Loss of Terrigenous Organic Carbon in Surface Sediments Across the Laptev and East Siberian Sea // *Global Biogeochem Cycles*. 2019. V. 33(1). P. 85–99.
30. *Bröder L., Davydova A., Davydov S. et al.* Particulate Organic Matter Dynamics in a Permafrost Headwater Stream and the Kolyma River Mainstem // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2020. V. 125. e2019JG005511.
31. *Bröder L., Tesi T., Andersson A. et al.* Bounding cross-shelf transport time and degradation in Siberian-Arctic land-ocean carbon transfer // *Nature Communications*. 2018. V. 9. 806.
32. *Bröder L., Tesi T., Salvadó J.A. et al.* Fate of terrigenous organic matter across the Laptev Sea from the mouth of the Lena River to the deep sea of the Arctic interior // *Biogeosciences*. 2016. V. 13. P. 5003–5019.
33. *Charkin A.N., Dudarev O.V., Semiletov I.P. et al.* Seasonal and interannual variability of sedimentation and organic matter distribution in the Buor-Khaya Gulf: the primary recipient of input from Lena River and coastal erosion in the southeast Laptev Sea // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 2581–2594.
34. *Dowdeswell J.A., Ottesen D.* Buried iceberg ploughmarks in the early Quaternary sediments of the central North Sea: A two-million year record of glacial influence from 3D seismic data // *Marine Geology*. 2013. V. 344. P. 1–9.
35. *Gordeev V.V.* Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // *Geomorphology*. 2006. V. 80. P. 94–104.
36. *Grosse G., Schirmermeister L., Siegert C. et al.* Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the Late Quaternary // *Geomorphology*. 2007. V. 86. P. 25–51.
37. *Günther F., Overduin P.P., Sandakov A.V. et al.* Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. P. 4297–4318.
38. *Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A. et al.* Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 151–178.
39. *Gustafsson Ö, van Dongen B.E., Vonk J.E. et al.* Widespread release of old carbon across the Siberian Arctic echoed by its large rivers // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 1737–1743.
40. *Hubberten H.W., Andreev A., Astakhov V.I. et al.* The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the last glaciation // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 1333–1357.
41. *Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S. et al.* Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. P. 6573–6593.
42. *Jongejans L.L., Mangelsdorf K., Schirmermeister L. et al.* n-Alkane Characteristics of Thawed Permafrost Deposits Below a Thermokarst Lake on Bykovsky Peninsula, Northeastern Siberia // *Front. Environ. Sci.* 2020. V. 8. 118.
43. *Jongejans L.L., Strauss J., Lenz J. et al.* Organic matter characteristics in yedoma and thermokarst deposits on Baldwin Peninsula, west Alaska // *Biogeosciences*. 2018. V. 15. P. 6033–6048.
44. *Karlsson E. S., Charkin A., Dudarev O. et al.* Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of terrestrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 1865–1879.
45. *Lantuit H., Atkinson D., Overduin P.P. et al.* Coastal erosion dynamics on the permafrost-dominated Bykovsky Peninsula, north Siberia, 1951–2006 // *Polar Research*. 2011. V. 30. 7341.
46. *Manzoni S., Jackson R., Trofymow J. et al.* The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization // *Science*. 2008. V. 321 (5889). P. 684–686.
47. *Martens J., Romankevich E., Semiletov I. et al.* CASCADE – The Circum-Arctic Sediment Carbon Database // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13. P. 2561–2572.
48. *Martens J., Wild B., Muschitiello F. et al.* Remobilization of dormant carbon from Siberian-Arctic permafrost during three past warming events // *Science Advances*. 2020. V. 6. № 42. eabb6546.
49. *McClelland J.W., Holmes R.M., Dunton K.H. et al.* The Arctic Ocean Estuary // *Estuaries and Coasts*. 2012. V. 35. P. 353–368.
50. *Morgenstern A., Ulrich M., Günther F. et al.* Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study // *Geomorphology*. 2013. V. 201. P. 363–379.
51. *Obrezkova M.S., Tsoy I.B., Semiletov I.P. et al.* Micro-paleontological assessment of sediments from Buor-Khaya Bay (Laptev Sea) // *Quaternary International*. 2019. V. 508. P. 60–69.
52. *Overduin P.P., Strzelecki M.C., Grigoriev M.N. et al.* Coastal changes in the Arctic // *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences* / Eds. Martini I.P., Wanless, H.R. Geological Society of London Special Publication, 2014. V. 388. P. 103–129.
53. *Perminova I.V., Shirshin E.A., Zhrebker A. et al.* Signatures of Molecular Unification and Progressive Oxidation Unfold in Dissolved Organic Matter of the Ob-Irtysh River System along Its Path to the Arctic Ocean // *Sci. Reports*. 2019. V. 9. 19487.
54. *Pipko I.I., Pugach S.P., Semiletov I.P. et al.* The dynamics of the carbon dioxide system in the outer shelf and slope of the Eurasian Arctic Ocean // *Ocean Science*. 2017. V. 13. P. 997–1016.
55. *Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science*. 2018. V. 14. P. 87–103.
56. *Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V. et al.* Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 1359–1369.
57. *Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V. et al.* Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea

- Region, Russia // *Permafrost and Periglac. Process.* 2000. V. 11. P. 137–152.
58. *Sanchez-Garcia L., Vonk J.E., Charkin A.N. et al.* Characterization of three regimes of collapsing Arctic Ice Complex deposits on the SE Laptev Sea coast using biomarkers and dual carbon isotopes // *Permafrost and Periglac. Process.* 2014. V. 25. P. 172–183.
59. *Schirrmeister L., Grigoriev M.N., Strauss J. et al.* Sediment characteristics of a thermokarst lagoon in the northeastern Siberian Arctic (Ivashkina Lagoon, Bykovsky Peninsula) // *Arctos.* 2018. V. 4. 13.
60. *Schirrmeister L., Kunitsky V., Grosse G. et al.* Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on north-east Siberian Arctic coastal lowlands and islands – A review // *Quatern. Int.* 2011. V. 241. P. 3–25.
61. *Schirrmeister L., Schwamborn G., Overduin P.P. et al.* Yedoma Ice Complex of the Buor Khaya Peninsula (southern Laptev Sea) // *Biogeosciences.* 2017. V. 14. P. 1261–1283.
62. *Schirrmeister L., Siegert C., Kunitzky V.V. et al.* Late Quaternary ice-rich permafrost sequences as a paleoenvironmental archive for the Laptev Sea Region in northern Siberia // *Int. J. Earth Sciences.* 2002. V. 91. P. 154–167.
63. *Schirrmeister L., Siegert C., Kuznetsova T. et al.* Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // *Quaternary International.* 2002. V. 89. P. 97–118.
64. *Schuur E.A., Bockheim J., Canadell J.G. et al.* Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // *Bioscience.* 2008. V. 58. P. 701–714.
65. *Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C. et al.* Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature.* 2015. V. 520. P. 171–179.
66. *Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö. et al.* Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nature Geoscience.* 2016. V. 9. P. 361–365.
67. *Semiletov I.P., Shakhova N. E., Pipko I.I. et al.* Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay of the Laptev Sea // *Biogeosciences.* 2013. V. 10. P. 5977–5996.
68. *Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E.* Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the east siberian arctic shelf // *Geosciences.* 2019. V. 9(6). 251.
69. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al.* The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2015. V. 373. 20140451.
70. *Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al.* Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Communications.* 2017. V. 8. 15872.
71. *Siegert C., Schirrmeister L., Babiy O.* The sedimentological, mineralogical and geochemical composition of Late Pleistocene deposits from the Ice Complex on the Bykovsky Peninsula, Northern Siberia // *Polarforschung.* 2002. V. 70. P. 3–11.
72. *Stein R., Macdonald R.W.* The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004. 363 p.
73. *Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G. et al.* Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // *Earth-Science Reviews.* 2017. V. 172. P. 75–86.
74. *Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G. et al.* The deep permafrost carbon pool of the Yedoma region in Siberia and Alaska // *Geoph. Res. Letters.* 2013. V. 40. P. 6165–6170.
75. *Strauss J., Schirrmeister L., Wetterich S. et al.* Grain-size properties and organic-carbon stock of Yedoma Ice Complex permafrost from the Kolyma lowland, north-eastern Siberia // *Global Biogeochem. Cycl.* 2012. V. 26. GB3003.
76. *Tesi T., Semiletov I., Hugelius G. et al.* Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land–ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2014. V. 133. P. 235–256.
77. *Tesi T., Semiletov I.P., Dudarev O.V. et al.* Matrix association effects on hydrodynamic sorting and degradation of terrestrial organic matter during cross-shelf transport in the Laptev and East Siberian shelf seas // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2016. V. 121. P. 1–22.
78. *Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C. et al.* Permafrost collapse is accelerating carbon release // *Nature.* 2019. V. 569. P. 32–34.
79. *Vonk J.E., Gustafsson Ö.* Permafrost-carbon complexities // *Nature Geoscience.* 2013. V. 6. P. 675–676.
80. *Vonk J.E., Sanchez-Garcia L., van Dongen B.E. et al.* Activation of old carbon by erosion of coastal and sub-sea permafrost in Arctic Siberia // *Nature.* 2012. V. 489. P. 137–140.
81. *Vonk J.E., Semiletov I.P., Dudarev O.V. et al.* Preferential burial of permafrost-derived organic carbon in Siberian-Arctic shelf waters // *J. of Geoph. Res.: Oceans.* 2014. V. 119(12). P. 8410–8421.
82. *Vonk J.E., van Dongen B.E., Gustafsson Ö.* Selective preservation of old organic carbon fluvially released from sub-Arctic soils // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L11605.
83. *Winterfeld M., Mollenhauer G., Dumann W. et al.* Deglacial mobilization of pre-aged terrestrial carbon from degrading permafrost // *Nature Communications.* 2018. V. 9. 3666.
84. *Xiao X, Fahl K., Stein R.* Biomarker distributions in surface sediments from the Kara and Laptev seas (Arctic Ocean): indicators for organic-carbon sources and sea-ice coverage // *Quaternary Science Reviews.* 2013. V. 79. P. 40–52.
85. *Xu C.H., Guo L.D., Ping C.L. et al.* Chemical and isotopic characterization of size-fractionated organic matter from cryoturbated tundra soils, northern Alaska // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2009. V. 114. G03002.
86. *Zimov S.A., Davydov S.P., Zimova G.M. et al.* Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L20502.
87. *Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin III S.F.* Permafrost and the Global Carbon Budget // *Science.* 2006. V. 312. P. 1612–1613.

Concentration, Isotopic and Elemental Composition of Organic Matter in Subsea Thawed and Permafrost Deposits of the Buor-Khaya Bay

A. S. Ulyantsev^{a, #}, S. Yu. Bratskaya^{b, ##}, O. V. Dudarev^{c, ###}, I. P. Semiletov^c

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

^b*Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

^c*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

[#]*e-mail: uleg85@gmail.com*

^{##}*e-mail: s.bratskaya@gmail.com*

^{###}*e-mail: dudarev@poi.dvo.ru*

A comparative analysis of the content and composition of organic matter (OM) in samples of bottom sediments and subaqueous permafrost rocks by the concentration of organic carbon (OC), C/N ratio and isotopic composition of OC ($\delta^{13}\text{C}$) was carried out for three wells drilled in Buor-Khaya Bay in 2014–2015. The intervals of OC, C/N and $\delta^{13}\text{C}$ values measured in 105 samples ranged from 0.04 to 23.1% (avg. 2.08%), from 1.00 to 41.7 (avg. 11.8) and from -29.1 to -19.6% (avg. -24.9%), respectively. The highest concentrations of OC were found on horizons enriched with plant detritus. Based on the totality of the data obtained, it is shown that the studied sediments and permafrost rocks contain OM of plant, lacustrine and marine origin. In most samples, it is mixed, but enriched with components of continental vegetation and lacustrine origin. According to the isotopic and elemental composition of the OM, it was found that the sediments of the Yedoma Suite and the Ice Complex are present in the studied strata, to a lesser extent – deposits of thermokarst lakes and basins flooded by the sea. At a relative distance from the continent, an isotopic weighting of OC was recorded, associated with an increased share of aquatic components in the OM, which is confirmed by data on the molecular composition of n-alkanes. There is no correlation between the grain size of sediments and the measured organic geochemical parameters, which is a distinctive feature of the studied alluvial strata.

Keywords: Arctic, coastal zone, bottom sediments, subsea permafrost, organic carbon, stable carbon isotopes, C/N ratio, cryotic type, grain size