

ПОСТУПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЗАЛИВ БУОР-ХАЯ (море Лаптевых)

Т.В. Погодаева, Т.В. Ходжер, Н.А. Жученко, М.Н. Григорьев*, В.С. Панов **, Г.Т. Максимов*

Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

** Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия*

*** Институт археологии и этнографии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17, Россия*

Приводятся результаты исследования органического вещества в береговых и донных отложениях залива Буор-Хая (море Лаптевых). Установлены закономерности распределения органического материала в прибрежно-шельфовой зоне, прилегающей к льдистым берегам. Берега, сложенные ледовым комплексом, по сравнению с другими типами берегов поставляют в море наибольшее количество органического материала, среднее содержание которого в этих толщах составляет около 2—3 мас. %. В прибрежной мелководной зоне донные отложения существенно обеднены $C_{\text{орг}}$ (0.1—0.3 %) в связи с активным перемывом отложений и перемещением тонкодисперсного материала, в первую очередь органического, в сторону больших глубин моря. Отмечается отчетливое повышение концентрации $C_{\text{орг}}$ в донных осадках по мере увеличения глубин моря до 7—10 м на расстоянии 5—12 км от берега, где содержание углерода составляет 1—2 %. В приустьевых частях морской акватории часто возникают локальные аномалии, где концентрации $C_{\text{орг}}$ достигают 4—5 %. Наибольшие концентрации $C_{\text{орг}}$ устанавливаются в современных морских отложениях — в центральных, относительно глубоких частях заливов ($C_{\text{орг}}$ до 3 %).

Донные отложения, органический углерод, органический азот, изотопы углерода, изотопы азота, Арктика, море Лаптевых.

INPUT OF ORGANIC MATTER TO THE BUOR-KHAYA GULF (Laptev Sea)

T.V. Pogodaeva, T.V. Khodzher, N.A. Zhuchenko, M.N. Grigoriev, V.S. Panov, and G.T. Maksimov

We present results of study of organic matter in the coastal and bottom sediments of the Laptev Sea (Buor-Khaya Gulf). The study has shown the regularities of organic-matter distribution in the shelf zone adjacent to the glacial coast. The coast composed of a glacial rock complex supplies the largest amount of organic material to the sea as compared with other types of the coast. The average content of organic matter in these strata is ~2—3 wt.%. The bottom sediments of the shallow littoral zone are significantly depleted in organic carbon (0.1—0.3%) as a result of their active rewashing and the transition of finely dispersed material (mainly organic one) toward the deep sea zones. The content of organic carbon in the bottom sediments increases to 1—2% as the sea deepens to 7—10 m at 5—12 km from the coast. There are frequent local anomalies of organic-carbon contents (up to 4—5%) in the deltaic zones of the sea. The highest contents of organic carbon (up to 3%) have been found in the recent marine sediments in the central, relatively deep zones of the bays.

Bottom sediments, organic carbon, organic nitrogen, carbon isotopes, nitrogen isotopes, Arctic, Laptev Sea

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы, особенно в связи с прогнозируемым потеплением климата в Арктике, большой интерес проявляется к данным о поступлении в Арктический бассейн органического углерода, который является источником парниковых газов [Naidu, 1985; Романкевич, Ветров, 2001; Guo, Macdonald, 2006; Schuur et al., 2008; Bense et al., 2009; Frey, McClelland, 2009; Richter-Menge, Overland, 2010; Gustafsson et al., 2011; Achberger et al., 2013]. Достоверно установлено, что доминирующими источниками терригенного выноса органического углерода в арктические моря являются речной твердый сток и поток наносов из берегов [Шуйский, 1983; Reimnitz et al., 1988; Are, 1999; Rachold et al., 2000, 2004; Григорьев, Куницкий, 2000; Grigoriev et al., 2001, 2004a; Grigoriev, Rachold, 2003; Eicken, 2004; Stein, Macdonald, 2004; Григорьев, 2004; Guo et al., 2007; Charkin et al., 2011]. На значительном протяжении побережья арктических морей, особенно в восточной части РФ, сложены льдистыми породами (так называемый «ледовый комплекс») и отложениями термокарстовых депрессий [Григорьев, Куницкий, 2000; Grigoriev et al., 2001, 2004b; Grigoriev, Rachold, 2003; Григорьев, 2004]. В силу наличия в этих породах многочис-

ленных растительных остатков, например торфяных скоплений, они характеризуются достаточно высоким содержанием органического углерода. Вследствие активного разрушения берегов, в особенности ледового комплекса, на значительной части прилегающего шельфа формируются суспензионные потоки, хорошо заметные на космических снимках [<http://www.visibleearth.nasa.gov>]. В более глубокие части моря привнос осадков (и органического углерода) осуществляется придонными течениями в виде перемещения взвесей и влекомого донного материала, в основном в сторону увеличения глубин моря, согласуясь с батиметрическими параметрами и рельефом дна. По мнению ряда исследователей [Северный..., 1985; Рекант, 2001; Rekant, 2002], основными артериями, по которым транспортируется большая часть донных осадков, являются долины палеорек, которые сформировались в эпохи зырянской, сартанской и предыдущих регрессий моря.

Для детального изучения этих процессов как нельзя лучше подходит губа Буор-Хая, расположенная в центральной части моря Лаптевых. За счет твердого стока крупной сибирской реки Лены здесь формируется подводное продолжение ее дельты. Около трети протяженности побережья губы характеризуются крутыми клифами высотой до 40 м, сложенными породами ледового комплекса, которые интенсивно перерабатываются процессами термоабразии, максимальные скорости которой достигают 10—20 м в год, например, на о. Муостах [Григорьев, Куницкий, 2000]. В последние 10—15 лет темпы разрушения льдистых берегов существенно увеличились [Григорьев и др., 2006]. Это связывается с повышением летней приземной температуры воздуха в регионе, небольшим увеличением мощности сезонно-талого слоя на береговых склонах, а также с повышением штормовой активности в Арктике в связи с существенным расширением свободной от сплоченных льдов зоны акватории в летний сезон.

Льдистые морские берега также характерны для дельты Лены, где среднегодовая скорость отступления берегов составляет 2—3 м/год [Григорьев, 1993]. Поступающий в морскую акваторию терригенный материал содержит большое количество органического вещества, причем его поток, в связи с усилением береговой эрозии, возрастает. Одна из задач — выявить особенности распределения органического вещества в береговой зоне и закономерности его распространения и осаждения на прибрежном шельфе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые работы на побережье и шельфе губы Буор-Хая моря Лаптевых были проведены Институтом мерзлотоведения СО РАН в 2010—2013 гг. (рис. 1). Буровые экспедиции по изучению донных осадков в центральной части губы Буор-Хая проведены совместно с коллегами из Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН, Московского государственного университета и Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (Германия).

В августе 2010 г. в термоабразивной береговой зоне западного побережья п-ова Буор-Хая, сложенных льдистыми породами с мощными повторно-жильными льдами, по семи профилям было отобрано 137 проб поверхностных отложений. Образцы отобраны из береговой зоны и в пределах подводного берегового склона на удалении в море до 10 км по одним и тем же профилям. Часть проб отобрана в р. Орто-Стан и ее устье.

В апреле 2011 г. на прибрежном шельфе бурением с морского льда был вскрыт 50-метровый разрез донных грунтов в 17.5 км на северо-восток от о. Муостах (координаты: 71°41'33.4" N, 130°22'00.2" E). Получен керн донных отложений из которого отобраны 62 пробы. Из берегового обнажения м. Муостах (Быковский полуостров) отобрано 11 проб. Координаты отбора образцов: 71°42'18.67" N, 129°35'45.57" E.

В апреле 2012 г. получен керн талых и многолетнемерзлых донных отложений из 50-метровой колонки скважины вблизи западного побережья губы Буор-Хая (координаты 71°25'20.4" N, 132°05'04.9" E). Из этих толщ отобраны 34 пробы.

В августе 2012 г. из берегового уступа о. Муостах (на северо-восточном его побережье) высотой 19 м, представленного ледовым комплексом с мощными повторно-жильными льдами, а также на прилегающем пляже (разрез М-11-2012, координаты 71°35'41.9" N, 129°59'41.7" E) (см. рис. 1) было отобрано 28 проб поверхностных отложений.

В апреле 2013 г. пробурены две скважины по профилю от северного мыса о. Муостах к Быковскому полуострову (см. рис. 1) (30-метровая скв. II D-13 и 20-метровая скв. IV D-13). Из донных отложений отобрано 23 и 12 проб соответственно. Кроме того, пробурена 40-метровая скважина на самом Быковском полуострове, в центре Ивашкиной лагуны, представляющей собой бывшее термокарстовое озеро, подверженное временному влиянию моря. Из донных отложений скв. V D-13 отобрано 18 проб.

В августе 2013 г. в проливе (см. рис. 1), западнее о. Муостах, отобраны пробы донного поверхностного грунта.

Пробы были взяты на различные виды анализов, включая определения концентраций органического углерода, азота, отношения C/N.

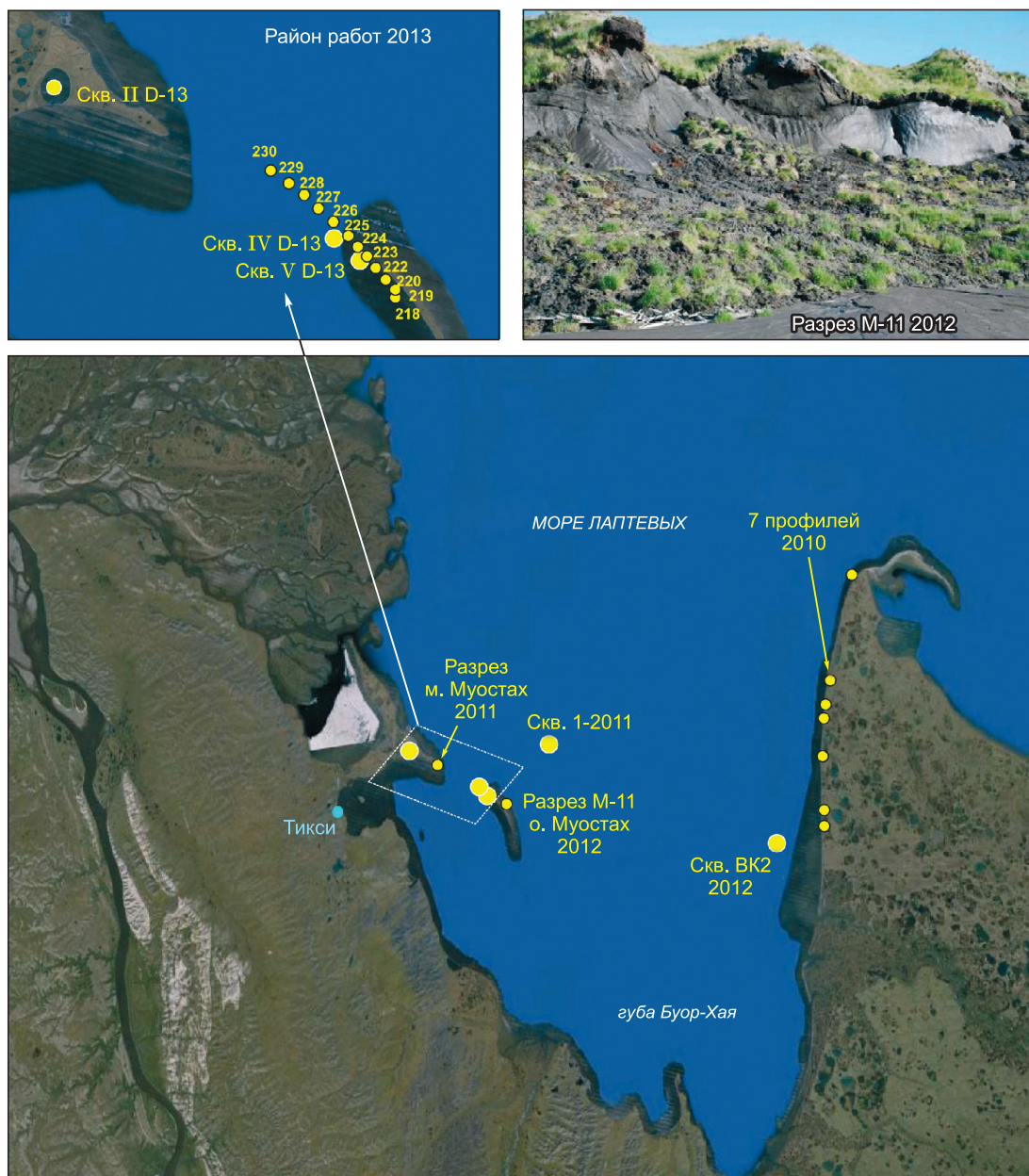


Рис. 1. Залив Буор-Хая моря Лаптевых.

Карта-схема отбора проб.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) и азота ($N_{орг}$) в пробах определяли в аккредитованной (№ РОСС RU. 0001.513855) лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН методом каталитического высокотемпературного окисления образцов при $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующим определением CO_2 с помощью ИК детектора на высокотемпературном анализаторе углерода Vario TOC cube. Все образцы обработаны 10%-м раствором соляной кислоты (осч, деионизованная вода, $\text{TOC} < 1\text{ мг/т}$) для удаления карбонатов, высушены при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы (ГОСТ 23740-79). В качестве конечного результата взяты средние значения трех измерений одного образца. Стандартное отклонение не превышает 0.01%.

Изотопные отношения определяли методом газовой изотопной масс-спектрометрии в Институте археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск), стандартное отклонение при съемке вещества стандарта (лимонная кислота, Aldrich) не превышает 0.12 %. В качестве конечного результата взяты средние значения двух измерений одного образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Береговая зона западного побережья п-ова Буор-Хая сложена преимущественно плейстоценовыми породами ледового комплекса, представляющими собой суглинки с высоким содержанием органического материала – остатков растительности и торфяных включений. Объемная льдистость пород при этом составляет свыше 50 %. Отложения вблизи уреза моря и на мелководье при глубине моря до 2 м представлены средне- и мелкозернистым песком. Поверхностные донные отложения при глубине моря свыше 2 м представляют собой супесь. Проба в р. Орто-Стан представлена супесью, в устьевой зоне – песком.

Содержание органического углерода в отложениях ледового комплекса и в осадках аласных депрессий, вскрытых в береговых обрывах и опробованных серией профилей, составило от 0.82 до 5.8 % в суглинках и до 48 % в торфяных прослоях от массы вмещающих толщ. В то же время на прибрежном мелководье в песках содержание органического углерода в поверхностных осадках крайне низкое – от 0.04 до 0.18 % (рис. 2). По всем морским профилям в супесях, сменяющих пески по мере увеличения глубины моря (до 7–10 м на расстоянии 5–12 км от берега), содержания $C_{\text{орг}}$ невелики — 0.14–0.63 % с небольшим трендом увеличения содержания с глубиной моря. При этом во впадинах (понижении рельефа) содержание $C_{\text{орг}}$ достигает 5 %. По всем профилям отмечалось повышенное содержание $C_{\text{орг}}$ в толщах, где доминируют мелкие фракции осадка.

В 50-метровом разрезе донных отложений скважины в 17.5 км северо-восточнее о. Муостах наибольшей насыщенностью органическим материалом отличалась верхняя пачка донных осадков мощностью около 6 м, особенно значительно было содержание $C_{\text{орг}}$ (до 3 %) в верхнем 33-сантиметровом слое ила (рис. 3, б). Осадок во всем керне этого диапазона имел алевроитово-глинистую структуру, темно-серый оттенок и характеризовался субгоризонтальной слоистостью. Ниже по разрезу, на горизонтах 18, 23 и 38 м ниже дна моря, находились еще несколько пачек осадков существенно насыщенных органикой (до 2 % $C_{\text{орг}}$). Минимальное количество органического вещества определено в песках 0.09–0.31 %. По данным изотопного состава органического углерода, $\delta^{13}\text{C}$ меняется от 26 ‰ в слоях, насыщенных органикой, до 23 ‰. Осадки по всему разрезу характеризуются морским засолением и находятся в зоне отрицательных температур (–0.3... –1.0 °C).

Полуостров Быковский, как и большая часть побережья изучаемого региона, сложен льдистыми породами ледового комплекса и тонкозернистыми аласными отложениями. Состав отложений меняется от песчаного уреза моря до оторфованного суглинка на высоте 25 м. Насыщенность органикой этих отложений оказалась очень высокой (см. рис. 3, а), в среднем около 3 % $C_{\text{орг}}$, причем в верхней части разреза до 12 %. При этом $\delta^{13}\text{C}$ изменялось от 29 ‰ в оторфованной супесях до 23 ‰ в песках.

В отложениях береговой зоны о. Муостах (рис. 4, а) наиболее высокое содержание $C_{\text{орг}}$ определено на вершине уступа в торфе (84.4 %) и оторфованных супесях (31.2 %). В песках самого уступа и прибрежных песках содержание $C_{\text{орг}}$ невысокое (0.76–1.73 %). Содержание $N_{\text{орг}}$ составляет 0.04–0.09 % и зависит от доли примеси органического вещества, т.е. в корреляции с содержанием $C_{\text{орг}}$. Отношение C/N варьирует от 15 до 50. Минимальное соотношение C/N присуще песчаным отложениям.

В 50-метровой колонке донных отложений из скважины вблизи западного побережья губы Буор-Хая максимальные значения $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{орг}}$ определяются в прослоях, насыщенных органикой и древесным детритом: 0.7–2.0 и 0.02–0.04 % (см. рис. 4, в). В песках концентрации составляют 0.16–0.40 и 0.007–0.015 %, практически не меняясь с глубиной осадков. Отмечается высокое (как и в береговых уступах) отношение C/N – 10–78. Максимальное отношение C/N определено в прослоях насыщенных органикой, особенно древесным детритом.

Исследование распределения содержания $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{орг}}$ в толще осадков 30- и 20-метровых скважин по профилю от северного мыса о. Муостах к Быковскому полуострову (скважины II D-13 и IV D-13) показало высокие значения в верхних тонкодисперсных отложениях (до 8 % $C_{\text{орг}}$ и 0.13 % $N_{\text{орг}}$), снижающихся в последующих суглинках и минимальные значения в песках (рис. 5). Очень высокие значения (до 26 % $C_{\text{орг}}$ и 0.92 % $N_{\text{орг}}$) отмечались в прослоях с включениями органики (торфа, древесного детрита). Отношение C/N, составляя в целом 15–25, в насыщенных органикой прослоях возрастало иногда до 70.

В пробах поверхностного грунта в проливе, западнее о. Муостах, содержание $C_{\text{орг}}$ составило 0.49–0.63 %, $N_{\text{орг}}$ — 0.09–0.11 %, отношение C/N **варьировало от 4.8 до 6.3**. В целом содержание органических компонент обнаружило зависимость от рельефа дна пролива. Во впадине с глубиной моря 7 м содержание $C_{\text{орг}}$ составило 2.9 % при отношении C/N – 26.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Береговые отложения губы Буор-Хая, сложенные породами ледового комплекса, окаймляют губу с востока практически целиком (п-ов Буор-Хая) и частично с юго-запада (Быковский полуостров и о. Муостах). В них обнаруживаются общие закономерности распределения органического вещества, а

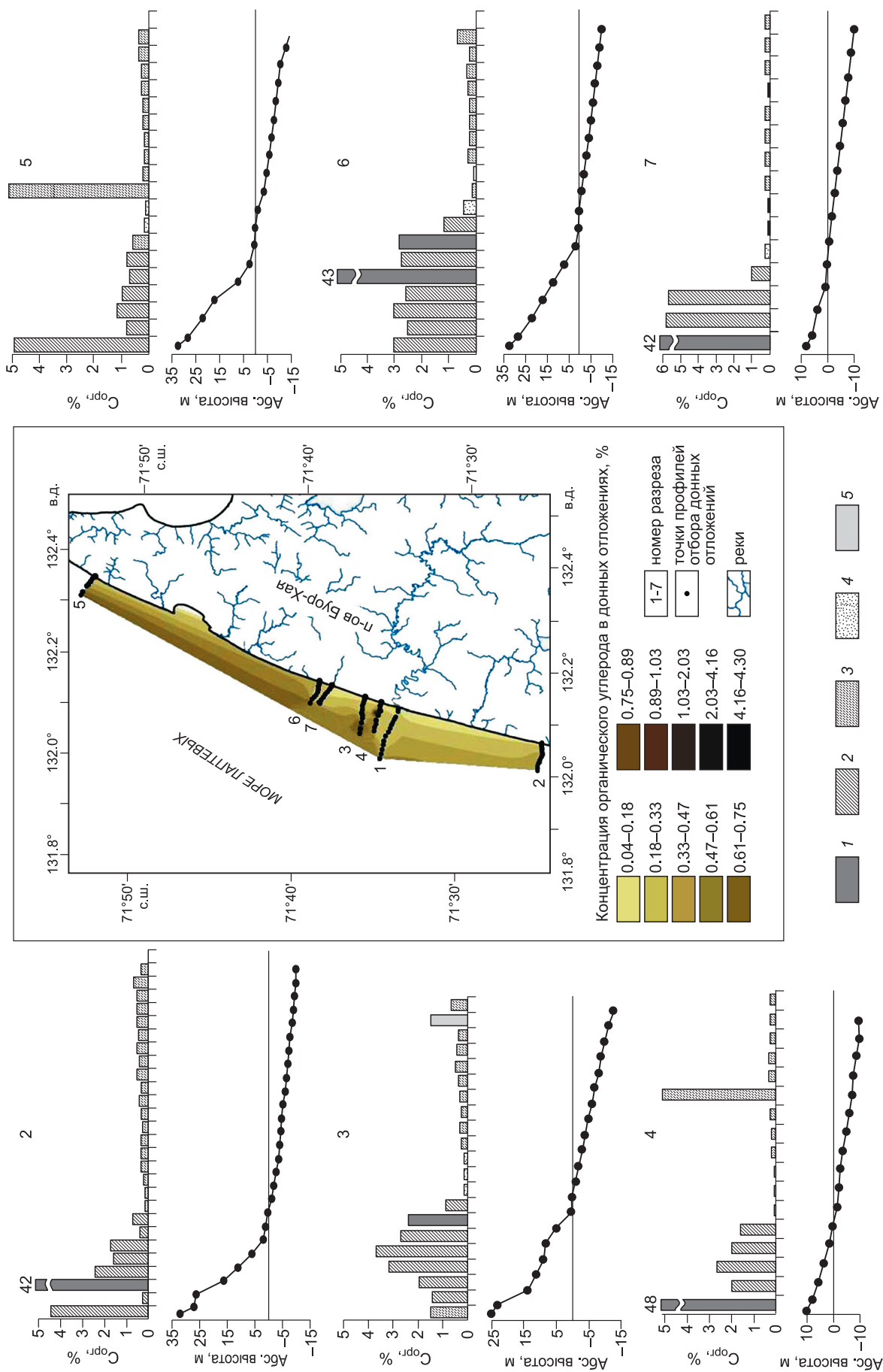


Рис. 2. Распределение концентрации $C_{орг}$ в отложениях береговых склонов на западном побережье п-ова Буор-Хая и в донных осадках губы Буор-Хая.

1 — торф, 2 — суглинок, 3 — супесь, 4 — песок, 5 — ил.

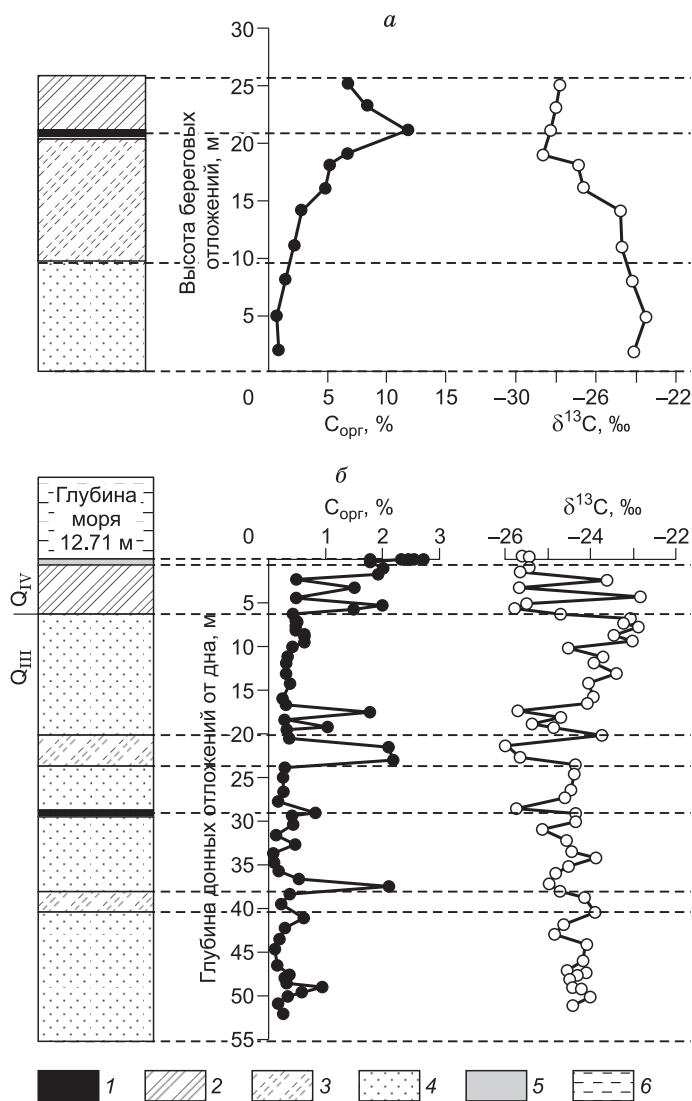


Рис. 3. Распределение C_{org} и $\delta^{13}C$ в береговом обнажении м. Муостах (а) и донных отложениях скважины, расположенной в 17.5 км на северо-восток от о. Муостах (б) (скв. 1, апрель, 2011 г.).

1 — торф, 2 — суглинок, 3 — супесь, 4 — песок, 5 — ил, 6 — вода.

также выявляется четкая зависимость его содержания и качества от высотного положения, рельефа местности и размерности фракций отложений. Берега характеризуются преимущественно крутыми клифами с абсолютными высотами 25—30 м. Они представлены суглинками с прослоями торфа, в которых сформирована сеть мощных повторно-жильных льдов, и покрыты растительностью. Именно в этих толщах отмечается максимальное содержание органического углерода — 3—12 % C_{org} в суглинках и до 48 % C_{org} в торфе (см. рис. 2—4). Данные изотопии показывают облегченный состав изотопов углерода $-29 \dots -27$ ‰ (см. рис. 3), отражающий, по [Xu et al., 2009; Vonk et al., 2010a,b, 2012; Sánchez-García et al., 2011], вклад свежего органического вещества (свежей растительности) и верхнего слоя мерзлотных почв Арктического региона. Обращает на себя внимание необычно высокое для почв отношение C/N (25-50), образующееся из очень высокого содержания органического углерода и крайне низкого содержания органического азота (см. рис. 4). Подобное соотношение, видимо, связано с высокой степенью оторфованности рассма-

триваемых толщ и отражает вклад недеградированного органического вещества (растительных остатков) [Каверин, Пастухов, 2013]. Отношение углерода к азоту (C/N) в подобных отложениях может достигать 80 и выше [Ковда, Розанов, 1988; Новиков, Кисаров, 2012]. Отношение углерода к азоту является важным показателем, так как показывает путь трансформации органического вещества. При высоком отношении C/N происходит иммобилизация азота и деградация органического вещества идет по пути образования и эмиссии CO_2 [Manzoni et al., 2008; Квиткина, 2012]. Высокие потоки CO_2 в рассматриваемых зонах были зафиксированы Дж. Вонк с коллегами [Vonk et al., 2010a, 2012]. По мере трансформации органических остатков органическое вещество в почвенном слое обогащается азотом, и отношение C/N уменьшается. При C/N = 20—25 активизируются микробные процессы образования гумуса и, соответственно, накопления C_{org} в отложениях, что отчетливо видно на рис. 4.

Отложения, расположенные ближе к основанию ледового комплекса, и осадки аласных термокарстовых депрессий представлены преимущественно суглинками и супесями. Содержание органического углерода в них также довольно высоко и составляет — 1—5 % C_{org} (см. рис. 2—4). Отношение углерода к азоту стабильно, несмотря на вариации содержания и азота, и углерода, и соответствует 18—20, величине, характерной для многолетнемерзлых толщ Арктики [Naidu et al., 1985; Xu et al., 2009; Каверин, Пастухов, 2013]. Данные изотопного анализа показывают более тяжелый состав изотопов углерода $-27 \dots -24$ ‰ (см. рис. 3), который соответствует старому углероду в плейстоценовых осадках [Vonk et al., 2010a, 2012]. При этом обнаруживается четкая зависимость утяжеления изотопного состава углерода с уменьшением содержания органического углерода ($R = 0.85$) и уменьшением абсолютной высоты опробованных горизонтов ($R = 0.83$). Последнее, вероятно, зависит от смены гранулометрического состава фракций отложений. Наиболее тяжелый $\delta^{13}C_{org}$ $-24.0 \dots -23.5$ ‰ определен в прибрежных песках при C_{org} 0.7—0.9 %. В песках на урезе моря — еще почти на порядок меньше 0.05—0.09 % C_{org} . В недав-

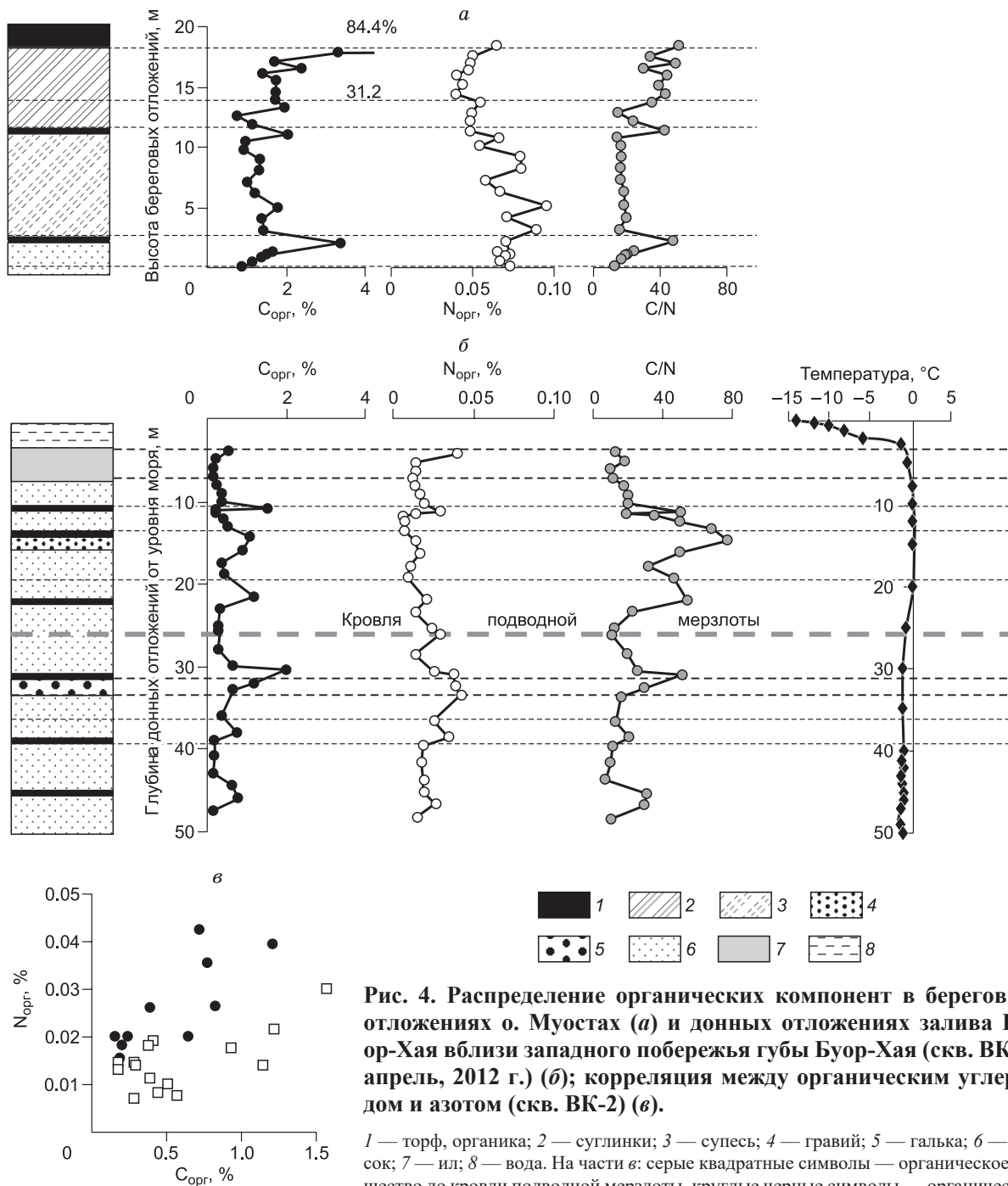


Рис. 4. Распределение органических компонент в береговых отложениях о. Муостах (а) и донных отложениях залива Буор-Хая вблизи западного побережья губы Буор-Хая (скв. ВК-2, апрель, 2012 г.) (б); корреляция между органическим углеродом и азотом (скв. ВК-2) (в).

1 — торф, органика; 2 — суглинки; 3 — супесь; 4 — гравий; 5 — галька; 6 — песок; 7 — ил; 8 — вода. На части в: серые квадратные символы — органическое вещество до кровли подводной мерзлоты, круглые черные символы — органическое вещество мерзлой толщи.

них экспериментальных исследованиях [Шинкарев и др., 2013] было подтверждено наличие взаимосвязи между реальной структурой глинистых минералов с лабильной кристаллической решеткой и связыванием органического вещества (ОВ) в устойчивую к окислительной деструкции форму при трансформации осадочных отложений в процессе формирования почв. Было показано, что литогенная основа минеральных субстратов различного состава при прочих равных условиях (температура, влажность) играет существенную роль в интенсивности процессов минерализации и гумификации, структурно-генетической трансформации продуктов гумификации и повышения их стабильности. Наличие устойчивости к деградации органического вещества, особенно старого, связанного с тонкодисперсными глинистыми частицами, было отмечено в работах [Xu et al., 2009; Karlsson et al., 2011]. Исследования



Рис. 5. Керн морской скв. ВК-2, представленной плотным слоистым песком с большим количеством растительного детрита (скв. ВК-2, апрель, 2012 г.).

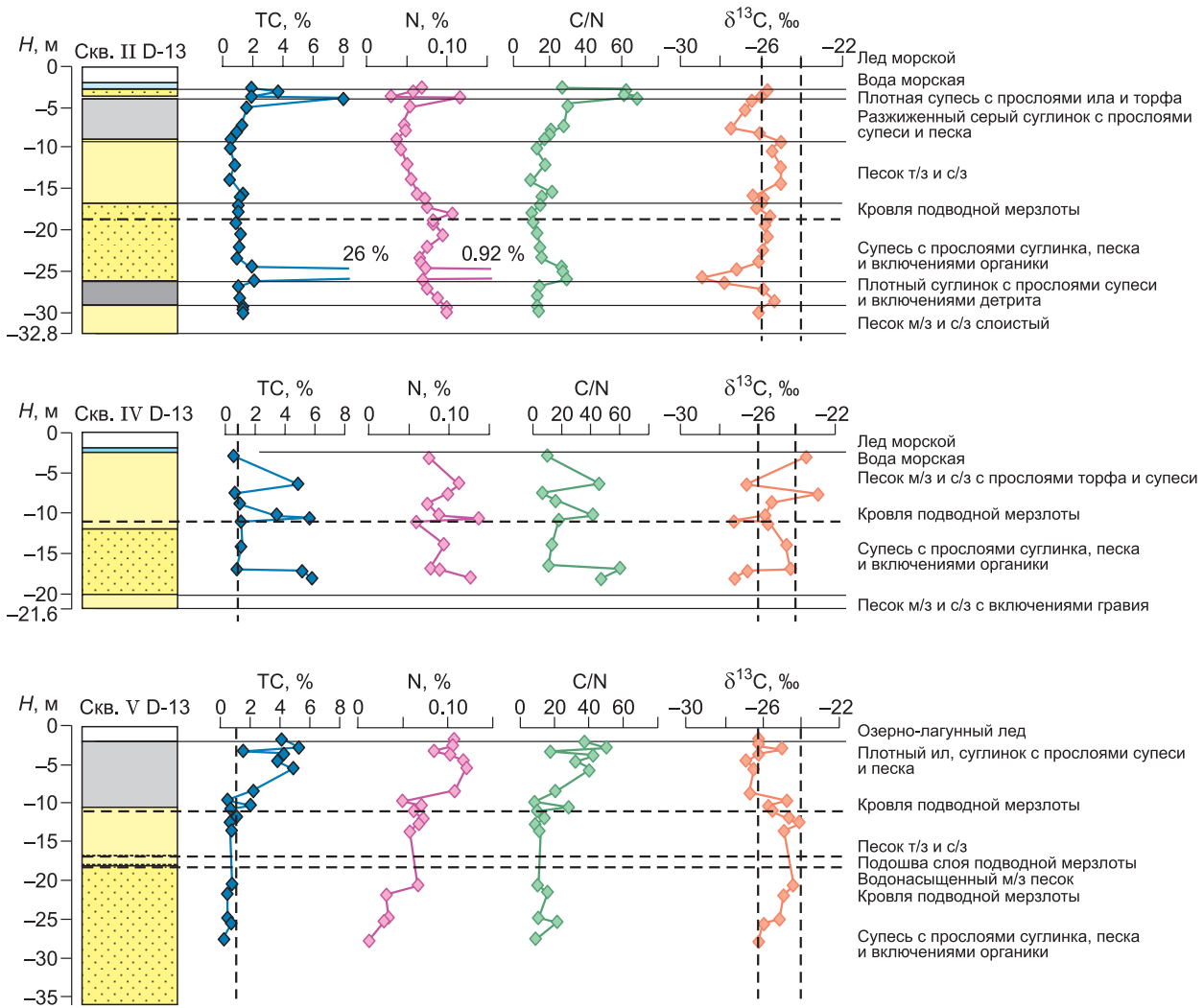


Рис. 6. Распределение органических компонент в донных отложениях морских скважин по профилю от северного мыса о. Муостах к Быковскому полуострову (скв. II, IV D-13) и скважины в центре лагуны на Быковском полуострове (скв. V D-13).

[Xu et al., 2009] показали, к тому же, высокую доступность к микробной деградации органического вещества, связанного с песками. Описанные процессы сопровождаются снижением соотношения C/N и утяжелением $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$. Наши данные также указывают на микробную деградацию $\text{C}_{\text{орг}}$ в песках у уреза воды. Таким образом, наши данные подтверждают выводы Дж. Вонка с коллегами [Vonk et al., 2012] о частичной деградации оттаявшего органического вещества, поступающего в воду залива.

Распределение органического вещества в донных отложениях зон пляжа и на подводном береговом склоне рассмотрено на семи разрезах вдоль западного побережья п-ова Буор-Хая (см. рис. 2). Пески у уреза воды, подверженные наиболее активному перемыву, содержали минимальное количество $\text{C}_{\text{орг}}$ 0.05—0.09 %. Имеется отчетливый тренд к увеличению содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ (от 0.10 до 0.63 %) с увеличением глубины моря (до 7—10 м) на удалении от 5 до 12 км от берега, что связано с увеличением доли тонкодисперсного и легко переносимого материала, оседающего на больших глубинах моря. В замкнутых или полузамкнутых депрессиях на дне в пределах подводного берегового склона отмечается наиболее тонкодисперсный материал с содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ до 5 %. Сортировка поступающего в залив органического вещества начинается в относительно мелководной части подводного берегового склона в результате активной переработки донных отложений в периоды штормовой активности. Легкие фракции свежего органического вещества (гуминовые соединения) [Vonk et al., 2010a,b; Karlsson et al., 2011] движутся к поверхности водной толщи; фракции старого органического вещества, связанные с более тяжелыми минеральными частицами, оседают, и чем крупнее, тем ближе к берегу. Органика, связанная с тонкодисперсными глинистыми частицами, переносится мутьевыми потоками в более глубокую часть акватории к подножию подводного берегового склона. Имеющиеся аномалии концентраций $\text{C}_{\text{орг}}$ на подводном склоне связаны с выносом больших объемов органики малыми реками, которые дренируют водосборные площади с широким распространением органосодержащих пород — плейстоценового ледового комплекса и осадков голоценовых термокарстовых котловин. В приустьевых частях, на границе с морской акваторией концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ достигают 4 %.

По нашим данным ($\delta^{13}\text{C} = -25 \text{‰}$, N – 0.05 %, C/N – 25) (см. рис. 3, 4, 6), органическое вещество поверхностных осадков залива имеет преимущественно терригенное происхождение, что хорошо согласуется с [Karlsson et al., 2011]. Единственный участок залива, где в поверхностных осадках превалирует ОБ биогенного происхождения ($\delta^{13}\text{C} = -22.5 \text{‰}$, N = 0.1 %, C/N = 5.5) (рис. 7), – это пролив между полуостровами Муостах и Быковским, отличающимися активным развитием термоабразионных и термомоденуационных процессов. Здесь, недалеко от впадения в море Быковской протоки дельты Лены, отмечаются наиболее мутные (122 мг/л взвеси) [Charikin et al., 2011] воды, содержание хлорофилла в которых, по данным А.А. Ветрова [Ветров и др., 2008], в 3 раза превышает средние данные по заливу (6.7 мг/м³), при этом первичная продукция достигает 800 мг C/(сут·м²), что в 8 раз превышает средние значения для моря Лаптевых. Первичная продукция, как известно, составляет материальную и энергетическую основу всех последующих этапов продукционного процесса, обеспечивая общую биологическую продуктивность водоема [Винберг, 1960].

Бурение серии 30—50-метровых скважин в акватории залива впервые позволило детально оценить распределение ОБ в толще его донных отложений. Выявилась четкая зависимость содержа-

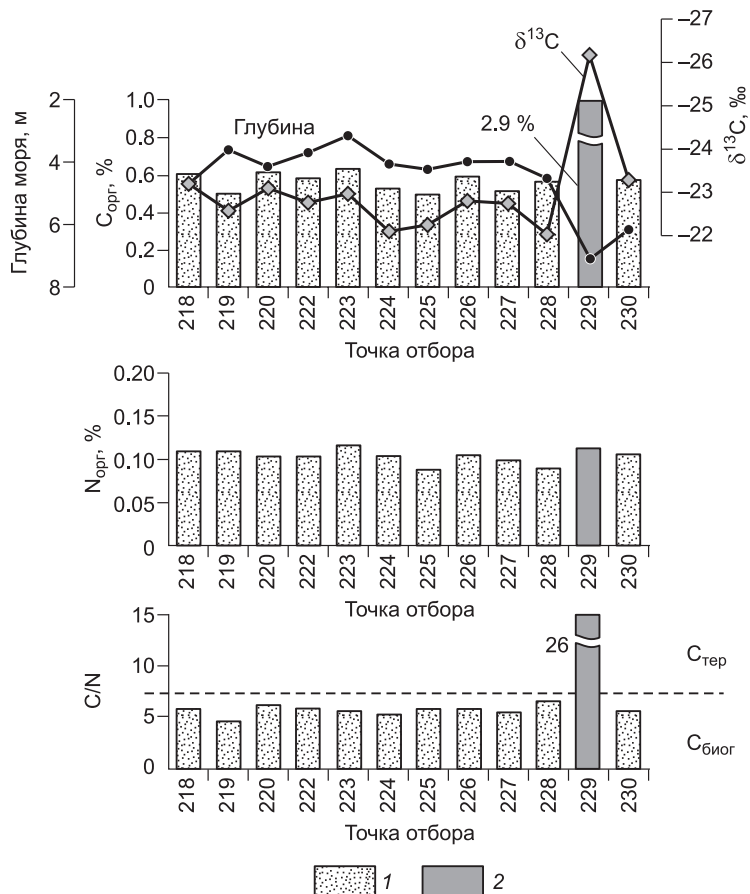


Рис. 7. Распределение органических компонент в поверхностных осадках пролива между о. Муостах и п-овом Быковский, апрель 2013 г.

1 — пески, 2 — суглинки.

ния ОВ и его качества от размерности фракций осадков. В свою очередь, накопление и смена осадков различного гранулометрического состава зависит от смены седиментологических обстановок, например, трансгрессий и регрессий моря. Полученные данные по ядрам донных (талых и многолетнемерзлых) пород хорошо согласуются с реконструкцией затопления шельфа моря Лаптевых [Vauch et al., 2001]. Все ядра скважин, отобранные в разных зонах залива (прибрежной, островной и центральной), содержат верхний 5—6-метровый слой, представленный заиленными голоценовыми осадками. По мере удаления в сторону моря отмечается увеличение доли илистой, глинистой фракции (до 55 %, по [Чувиллин и др., 2013]). Эта особенность связана с переносом тонкодисперсных глинистых частиц в виде мутьевых потоков в более глубокую часть акватории. Содержание органического углерода соответственно увеличивается с глубиной моря с 0.6 до 2.7 %. По данным анализов $\delta^{13}\text{C}$, N, C/N, органическое вещество имеет терригенный ($\delta^{13}\text{C}$ –26... –25 ‰) генезис (см. рис. 3) и соответствует древнему органическому веществу, высвобожденному из ледового комплекса в результате его разрушения активными береговыми процессами (см. рис. 2—4). Оно плотно связано с глинистыми частицами и наиболее устойчиво к деградации [Karlsson et al., 2011]. Наибольшее содержание ила и $C_{\text{орг}}$ отмечается в верхнем 33-сантиметровом слое скв. 1-2011 в центральной части залива. Непрерывность залегания и тонкодисперсность этого слоя донных отложений, а также высокое содержание в нем $C_{\text{орг}}$ позволяют говорить об увеличении поступления органического вещества в осадки в современных условиях.

Залегавшие ниже отложения скважин достаточно однородны и представлены мелко- и среднезернистыми слоистыми песками с многочисленными прослоями, насыщенными древесным детритом (см. рис. 3—5), наблюдаемым вплоть до забоя скважин. Вскрытая при бурении мощная песчаная толща имеет плейстоценовый и плиоценовый (буорхайнская свита) возраст [Григорьев, 1996]. По реконструкции авторов работы [Vauch et al., 2001], эти толщи относятся к континентальным осадкам, затопленным в ходе постгляциального повышения уровня моря (закончившегося примерно 5000 л.н.).

В целом в песках (исключая прослойки древесного детрита) содержание органического углерода очень низкое (0.2—0.4 % $C_{\text{орг}}$) и достаточно однородно до самого забоя. Включения древесного детрита увеличивают содержания $C_{\text{орг}}$ до 2.2 %, а включения торфа – до 6—26 %. Учитывая многочисленность насыщенных органикой прослоев, содержание органического углерода в толще осадков залива весьма значительно. Содержание в осадках азота в целом не превышает 0.05 %, составляя в среднем 0.02 %. Несколько более высокие значения отмечаются в отложениях у о. Муостях, определяемые большей долей пылевато-глинистой фракции (см. рис. 4). Характер распределения органического углерода и азота по глубине отложений отражает континентальный режим осадконакопления (см. рис. 3), при котором происходит накопление азота в результате его иммобилизации при аэробной деградации органического вещества. Отношение углерода к азоту органического вещества также отражает его терригенное происхождение. В песках оно составляет 10—20, что соответствует величине, полученной нами для береговых отложений, и характерно для многолетнемерзлых толщ Арктики [Naidu et al., 1985; Xu et al., 2009]. В многочисленных зонах, насыщенных древесным детритом и органикой, C/N высокое (30—80), как у береговых отложений, и отражает вклад недеградированного берегового материала (остатки высшей наземной растительности). Иное распределение органического вещества выявляется по ядру скважины в толще отложений Ивашкиной лагуны (бывшем термокарстовом озере). Здесь, благодаря опережающему разложению азотсодержащих органических соединений в условиях субаквального осадконакопления, содержание азота уменьшается с глубиной.

По изотопному составу углерода органическое вещество отложений по материалам всех скважин залива имеет терригенное происхождение ($\delta^{13}\text{C}$ = –30... –23 ‰). Четко выделяются три группы ОВ: 1 — $\delta^{13}\text{C}$ = –30... –26 ‰ при C/N = 20—80 — растительный детрит, торф, органическое вещество при этом недеградированное, но способное к деградации; 2 — $\delta^{13}\text{C}$ = –26... –25 ‰ при C/N = 15—20 — органическое вещество, связанное с глинами, частично деградированное, но очень устойчивое к дальнейшей деградации; 3 — $\delta^{13}\text{C}$ = –25... –23 ‰ при C/N = 10—20 — **органическое вещество, связанное с** песками, деградированное и способное к дальнейшей деградации [Xu et al., 2009; Karlsson et al., 2011].

Известно, что грубозернистые отложения, насыщенные терригенным органическим веществом (остатки высшей наземной растительности), обычно относятся к газопроизводящим тогда, когда они находятся на большой глубине в течение достаточно протяженного геологического времени [Конторович и др., 2013; Ким, Родченко, 2013]. В наших исследованиях обращает на себя внимание утяжеление изотопного состава углерода песков у границы между плотными голоценовыми илами и подстилающими их более древними песками (см. рис. 3). Такое явление может быть результатом анаэробных процессов микробного разложения органических веществ в донных осадках, причем более высокую доступность микроорганизмам обеспечивают именно грубозернистые отложения [Xu et al., 2009]. В анаэробных условиях микробная деградация ОВ идет в сторону продуцирования изотопно легкого метана ($\delta^{13}\text{C}$ = –80... –60 ‰) [Заварзин, 1984], изотопный состав углерода биомассы самих микроорганизмов находится в пределах от –22.0... –18.5 ‰ [Леин и др., 2012; Иванов и др., 2012], соответственно,

суммарная величина $\delta^{13}\text{C}$ ОВ сдвигается в сторону его изотопного утяжеления. По данным бурения здесь обнаружен биогенный метан в очень высоких концентрациях [Сергиенко и др., 2010, 2012]. Учитывая высокую выживаемость арктических микроорганизмов в условиях низких температур и высокую микробиальную активность в протаявших осадках [Sánchez-García et al., 2011], можно предположить, что деградация органического вещества с современным продуцированием метана над кровлей подводных многолетнемерзлых пород все же происходит. Данный процесс требует более детального и конкретного дальнейшего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что отложения берегового комплекса залива Буор-Хая моря Лаптевых содержат большое количество (до 80 %) органического углерода.

Поступая в воды залива при термоабразионном разрушении побережья, органическое вещество в прибрежных поверхностных осадках не накапливается ($C_{\text{орг}}$ не превышает 0.6 %), а переносится мутьевыми потоками с более легкими фракциями осадка к центральной части залива ($C_{\text{орг}} = 2.7\%$) и далее к подножию подводного берегового склона.

Исследование распределения содержания $C_{\text{орг}}$ в толще осадков по серии скважин показало максимальные концентрации органики в верхних тонкодисперсных современных отложениях (2.7 % $C_{\text{орг}}$), снижающихся в нижележащих супесях и минимальные значения в песках, залегающих еще ниже.

Непрерывность залегания поверхностного 33-сантиметрового слоя донных отложений, а также его тонкодисперсность наряду с высоким содержанием в нем $C_{\text{орг}}$, позволяет говорить об увеличении поступления органического вещества в осадки в современных условиях.

Исследованиями также установлено, что деградация органического вещества в протаявших мерзлотных толщах возможна и происходит в современный период. В условиях дальнейшего потепления климата это в аэробных условиях может усилить эмиссию CO_2 в атмосферу, в анаэробных – увеличить насыщение CH_4 донных отложений.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН 23.9.

ЛИТЕРАТУРА

Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В., Пересыпкин В.И., Чаркин А.Н. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия, 2008, № 2, с. 183—195.

Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск, Изд-во АН БССР, 1960, 328 с.

Григорьев М.Н. Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск, Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993, 175 с.

Григорьев М.Н. Закономерности процессов термоабразии и термоденудации берегов арктических морей (на примере ключевых участков моря Лаптевых) // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн.1. — Ч. 3. Динамическая геокриология. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, с. 504—511.

Григорьев М.Н. Современные криогенные геолого-геоморфологические процессы в прибрежной зоне арктических морей Азии: динамика и потоки наносов // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Иркутск, 2004, вып. 1, с. 102—111.

Григорьев М.Н., Куницкий В.В. Ледовый комплекс арктического побережья Якутии как источник наносов на шельфе // Гидрометеорологические и биогеохимические исследования в Арктике. Труды Арктического регионального центра. Владивосток, Дальнаука, 2000, т. 2, с. 109—116.

Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли, 2006, № 4, с. 74—95.

Заварзин Г.А. Бактерии и состав атмосферы. М., Наука, 1984, 199 с.

Иванов М.В., Леин А.Ю., Захарова Е.Е., Саввичев А.С. Изотопный состав углерода органического вещества взвеси и донных осадков морей Восточной Арктики // Микробиология, 2012, т. 81, № 5, с. 645—655.

Каверин Д.А., Пастухов А.В. Генетическая характеристика мерзлотных почв оголенных пятен на плоскобугристых торфяниках Большеземельской тундры // Изв. Самар. науч. центра РАН, 2013, т. 15, № 3, с. 55—62.

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.

Ким Н.С., Родченко А.П. Органическая геохимия и нефтегазогенерационный потенциал юрских и меловых отложений Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1236—1252.

Ковда В. А., Розанов Б. Г. Почвоведение. М., Высш. шк., 1988, 400 с.

Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 972—1012.

Леин А.Ю., Кравчишина М.Д., Политова Н.В., Саввичев А.С., Веслополова Е.Ф., Мицкевич И.Н., Ульянова Н.В., Шевченко В.П., Иванов М.В. 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.

Новиков А.А., Кисаров О.П. Обоснование роли корневых и пожнивных остатков в агроценозах // Научный журнал КубГАУ, 2012, №78(04), с. 1—10.

Рекант П.В. Эволюция природных обстановок Лаптевоморской континентальной окраины в позднем плейстоцене на основании анализа сейсмоакустических материалов // Сборник научных трудов «Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала». Мурманск, Изд-во Кольского НЦ РАН, 2001, т. 2, с. 91—99.

Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл органического углерода в арктических морях России. М., Наука, 2001, 302 с.

Северный Ледовитый и Южный океаны / Под ред. А.Ф. Трешникова, С.С. Сальникова. Л., Наука, 1985, 501 с.

Сергиенко В.И., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Эмиссия метана и углекислого газа на Восточно-Сибирском шельфе — фактор глобальных климатических изменений // Материалы заседания Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики (Архангельск, 31 марта — 2 апреля, 2010 г.) Екатеринбург, 2010, с. 117—136.

Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Романовский Н.Н., Космач Д.А., Никольский Д.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Ананьев Р.А., Росляков А.Г., Салюк А.Н., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Юсупов В.И., Куриленко А.В., Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН, 2012, т. 446 (3), с. 330—335.

Шинкарев А.А.(мл.), Шинкарев А.А., Гиниятуллин К.Г. Глиноорганические взаимодействия в почвах как звено осадочного процесса // Материалы Международной научной конференции (Казань, 15—17 октября 2013 г.), Казань, 2013, с. 159—161.

Шуйский Ю.Д. Современный баланс наносов в береговой зоне моря: Автореф. дис. ... д. г.-м. н. М., МГУ, 1983, 41 с.

Чувилин Е.М., Буханов Б.А., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., Дударев О.В., Семилетов И.П. Теплопроводность донных отложений в районе губы Буор-Хая (шельф моря Лаптевых) // Криосфера Земли, 2013, № 2, с. 32—40.

Achberger C., Ackerman S.A., Folland C.K., Hauri C., Liu Y., Albanil A., Lobato-Sánchez R., Pascual-Ramírez R., Vazquez J.L., Alexander P., Tedesco M., Alfaro E.J., Amador J.A., Burrows J., Dunn R.J.H., Heimbach P., Rivera I.L., Allan R., Duguay C.R., Fogt R.L. State of the climate in 2012 // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2013, v. 94, № 8, p. 1—238.

Are F.E. The role of coastal retreat for sedimentation in the Laptev Sea // Land-ocean systems in the Siberian Arctic. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1999, p. 287—295.

Bauch H.A., Kassens H., Naidina O.D. Composition and flux of Holocene sediments on the eastern Laptev Sea shelf, Arctic Siberia // Quat. Res., 2001, 55(3), p. 344—351.

Bense V.F., Ferguson G., Kooi H. Evolution of shallow groundwater flow systems in areas of degrading permafrost // Geophys. Res. Lett., 2009, 36, L22401, doi:10.1029/2009gl039225.

Charkin A.N., Dudarev O.V., Semiletov I.P., Kruhmaliev A.V., Vonk J.E., Sánchez-García L., Karlsson E., Gustafsson Ö. 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 SE Laptev Sea // Biogeosci. Discuss., 2011, v. 8, p. 1917—1946, doi:10.5194/bgd-8-1917-2011.

Eicken H. The role of Arctic sea ice in transporting and cycling terrigenous organic matter // Organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. R. Stein, R.W. Macdonald. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2004, p. 45—53.

- Frey K.E., McClelland J.W.** Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // *Hydrol. Process.*, 2009, v. 23, p. 169–182, doi:10.1002/hyp.7196.
- Grigoriev M.N., Rachold V.** The degradation of coastal permafrost and the organic carbon balance of the Laptev and East Siberian Seas // *Proceedings of the 8th International conference on permafrost*, 21–25 July 2003, Zurich, Switzerland. Lisse, A.A. Balkema, 2003, v. 1, p. 319–324.
- Grigoriev M.N., Rachold V., Are F.E., Hubberten H.-W., Razumov S.O., Schneider W.** Coastal dynamics in the western Laptev Sea // *Reports on Polar research. Russian-German cooperation. System Laptev Sea 2000: The Expedition Lena 2000*. Bremerhaven, 2001, v. 388, p. 54–59.
- Grigoriev M.N., Rachold V., Hubberten H.W., Schirmermeister L.** Organic carbon input to the Arctic Seas through coastal erosion // *Organic carbon cycle in the Arctic Ocean: present and past* / Eds. R. Stein, R.W. Macdonald. Berlin, Springer-Verlag, 2004a, p. 41–47.
- Grigoriev M.N., Vasiliev A.A., Rachold V.** Siberian Arctic coasts: sediment and organic carbon fluxes in connection with permafrost degradation // *Eos Trans.*, 2004b, v. 85(47), Fall Meet. Suppl., Abstract C13A–0261.
- Guo L.D., Macdonald R.W.** Source and transport of terrigenous organic matter in the upper Yukon River: Evidence from isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$) composition of dissolved, colloidal, and particulate phases // *Geophys. Res. Lett.*, 2006, v. 20, Gb2011, doi:10.1029/2005gb002593.
- Guo L.D., Ping C.L., Macdonald R.W.** Mobilization pathways of organic carbon from permafrost to arctic rivers in a changing climate // *Geophys. Res. Lett.*, 2007, v. 34, L13603, doi:10.1029/2007gl030689.
- Gustafsson O., van Dongen B.E., Vonk J.E., Dudarev O.V., Semiletov I.P.** Widespread release of old carbon across the Siberian Arctic echoed by its large rivers // *Biogeosciences*, 2011, v. 8, p. 1737–1743, doi:10.5194/bg-8-1737-2011.
- Karlsson E.S., Charkin A., Dudarev O., Semiletov I., Vonk J. E., Sánchez-García L., Andersson A., Gustafsson Ö.** 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, doi:10.5194/bg-8-1865-2011.
- Manzoni S., Jackson R., Trofymow J., Porporato A.** The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization // *Science*, 2008, v. 321(5889), p. 684–686, doi:10.1126/science.1159792.
- Naidu A.S.** Organic carbon, nitrogen, and C/N ratios of deltaic sediments, North Arctic Alaska // *Transport of carbon and minerals in major world rivers*. SCOPE 58, Mitt. Geol.-Palaeontol. Inst. Univ., Hamburg, 1985, p. 311–321.
- Rachold V., Grigoriev M.N., Are F.E., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M.** Coastal erosion vs. riverine sediment discharge in the Arctic shelf seas // *Int. J. Earth Sci.*, 2000, v. 89, p. 450–460.
- Rachold V., Eicken H., Gordeev V., Grigoriev M., Hubberten H., Lisitzin A., Shevchenko V., Schirmermeister L.** Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean* / Eds. R. Stein, R.W. Macdonald. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2004, p. 33–55.
- Reimnitz E., Graves S.M., Barnes P.W.** Beaufort Sea coastal erosion, sediment flux, shoreline evolution and the erosional shelf profile. U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations, Map I-1182-G, 1988, 22 p.
- Rekant P.V.** Pleistocene sedimentation and sediment transport on the Laptev Sea Shelf and continental slope // *Climate drivers of the North*. Conference Abstracts, May 8-11, 2002, Kiel. Germany, p. 92–93.
- Richter-Menge J., Overland J.E.** Arctic Report Card 2010, available at: <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard> (last access: 17 June 2011), 2010.
- Sánchez-García L., Alling V., Pugach S., Vonk J., van Dongen B., Humborg C., Dudarev O., Semiletov I., Gustafsson Ö.** Inventories and behavior of particulate organic carbon in the Laptev and East Siberian seas // *Global Biogeochem. Cycles*, 2011, v. 25, p. 172–183, GB2007, doi:10.1029/2010GB003862.
- Schuur E.A., Bockheim J., Canadell J.G., Euskirchen E., Field C.B., Goryachkin S.V., Hagemann S., Kuhry P., Laffleur P., Lee H., Mazhitova G., Nelson F.E., Rinke A., Romanovsky V.E., Shiklomanov N., Tarnocai C., Venevsky S., Voge J.G., Zimov S.A.** Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // *Bioscience*, 2008, v. 58, p. 701–714, doi:10.1641/b580807.
- Stein R., Macdonald R.W.** *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2004, 382 p.
- Vonk J.E., van Dongen B.E., Gustafsson Ö.** Selective preservation of old organic carbon fluvially released from sub-Arctic soils // *Geophys. Res. Lett.*, 2010a, v. 37, L11605, doi:10.1029/2010gl042909.
- Vonk J.E., Sánchez-García L., Semiletov I., Dudarev O., Eglinton T., Andersson A., Gustafsson Ö.** Molecular and radiocarbon constraints on sources and degradation of terrestrial organic carbon along the Kolyma paleoriver transect, East Siberian Sea // *Biogeosciences*, 2010b, v.7, p. 3153–3166, doi:10.5194/bg-7-3153-2010.

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, v. 489(7414), p. 137—140, doi: 10.1038/nature11392.

Xu C.H., Guo L.D., Ping C.L., White D.M. Chemical and isotopic characterization of size-fractionated organic matter from cryoturbated tundra soils, northern Alaska // *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2009, v. 114, G03002, doi:10.1029/2008jg000846.

*Рекомендована к печати 6 июля 2016 г.
В.А. Каширцевым*

*Поступила в редакцию
27 октября 2015 г.*