

## 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.

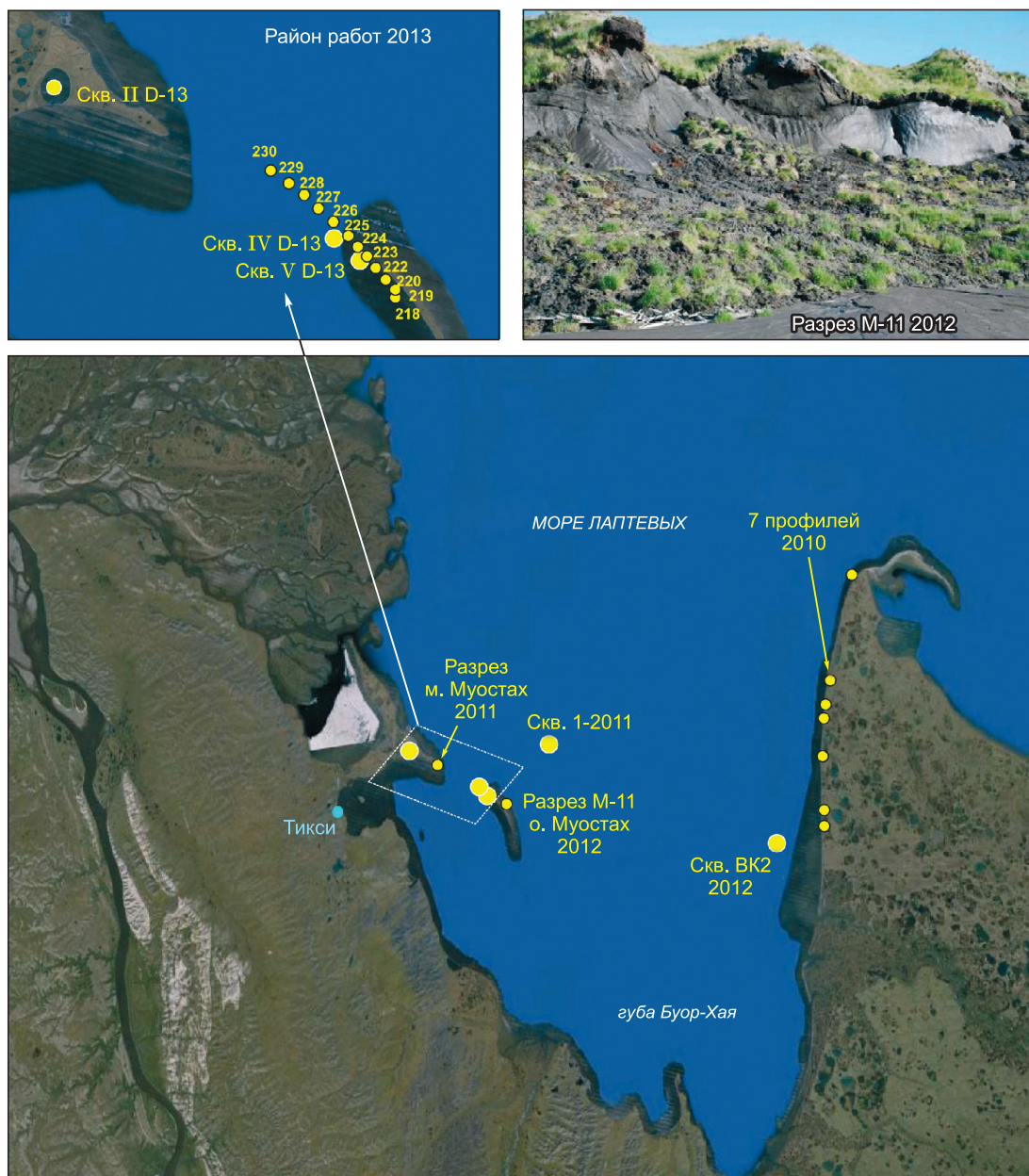
В апреле 2012 г. получен керн талых и многолетнемерзлых донных отложений из 50-метровой колонки скважины вблизи западного побережья губы Буор-Хая (координаты 71°25'20.4" N, 132°05'04.9" E). Из этих толщ отобраны 34 пробы.

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 °С 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,  $TOC < 1$  мг/т) для удаления карбонатов, высушены при 80 °С 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

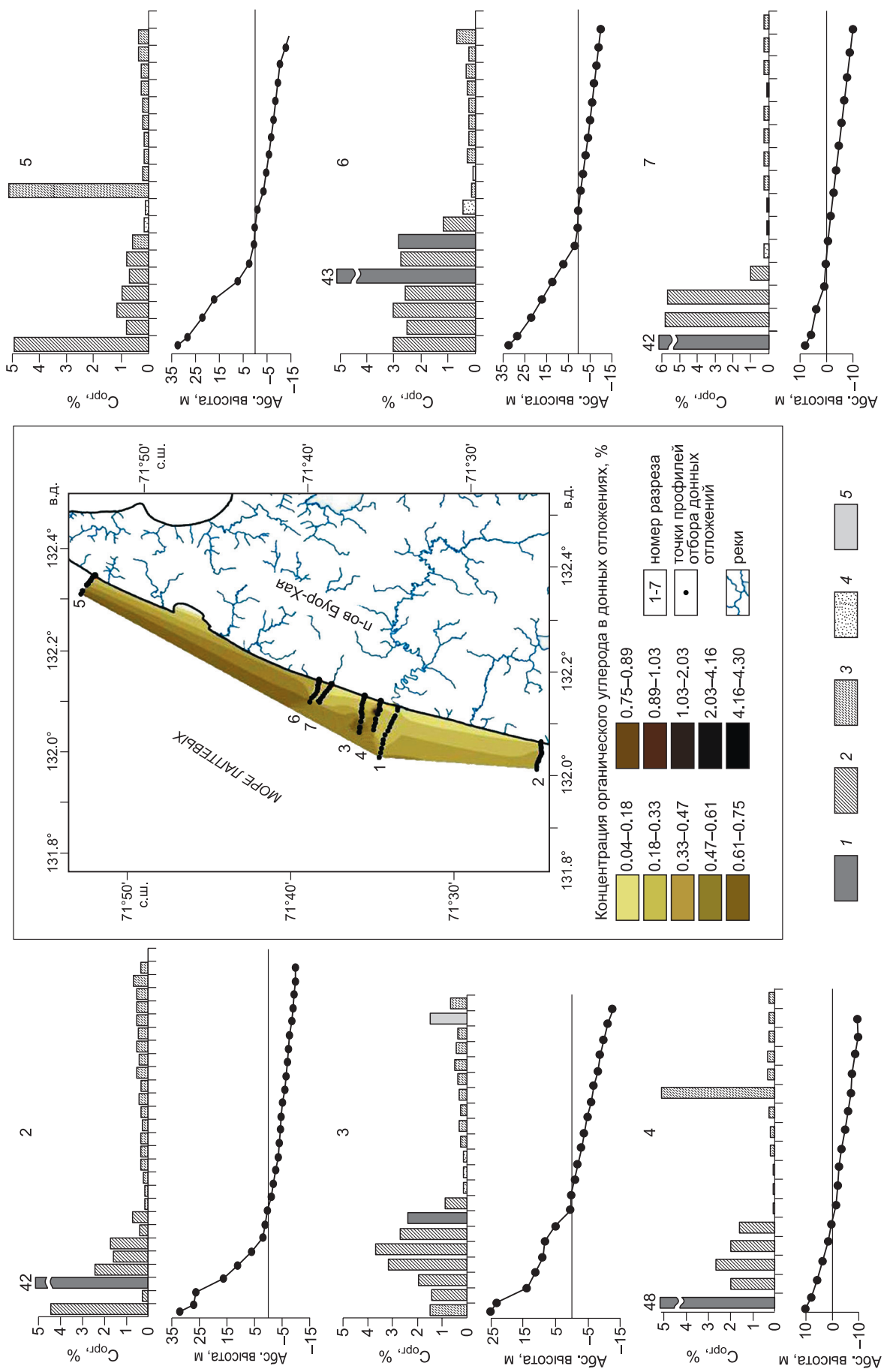


Рис. 2. Распределение концентрации  $C_{орг}$  в отложениях береговых склонов на западном побережье п-ова Буор-Хая и в донных осадках губы Буор-Хая.

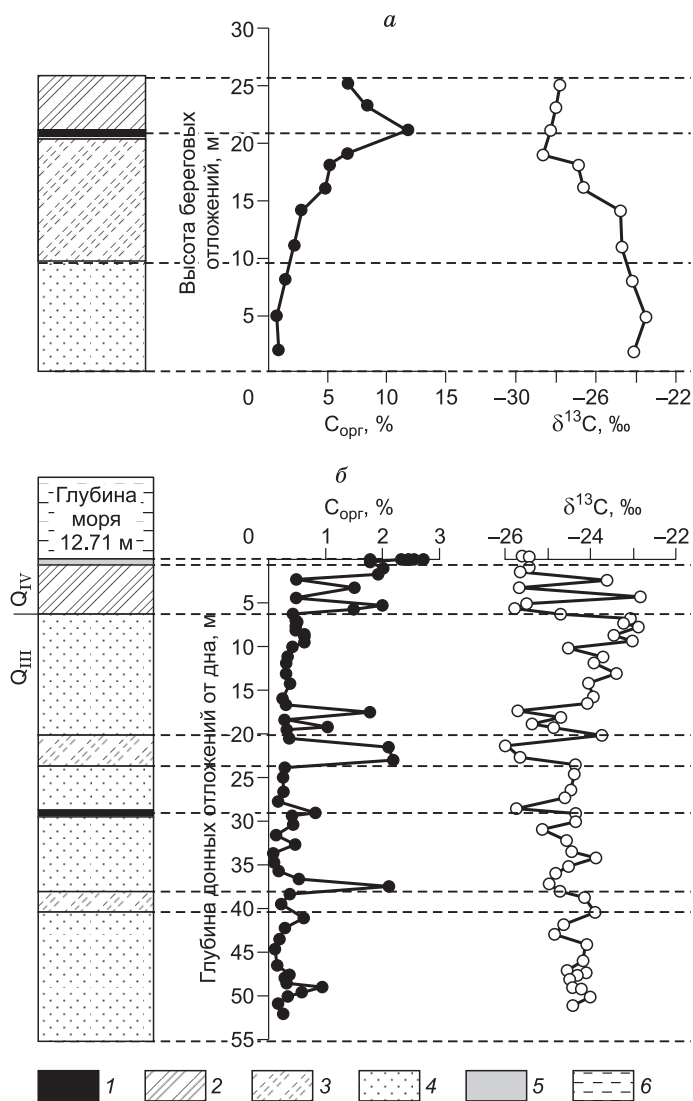


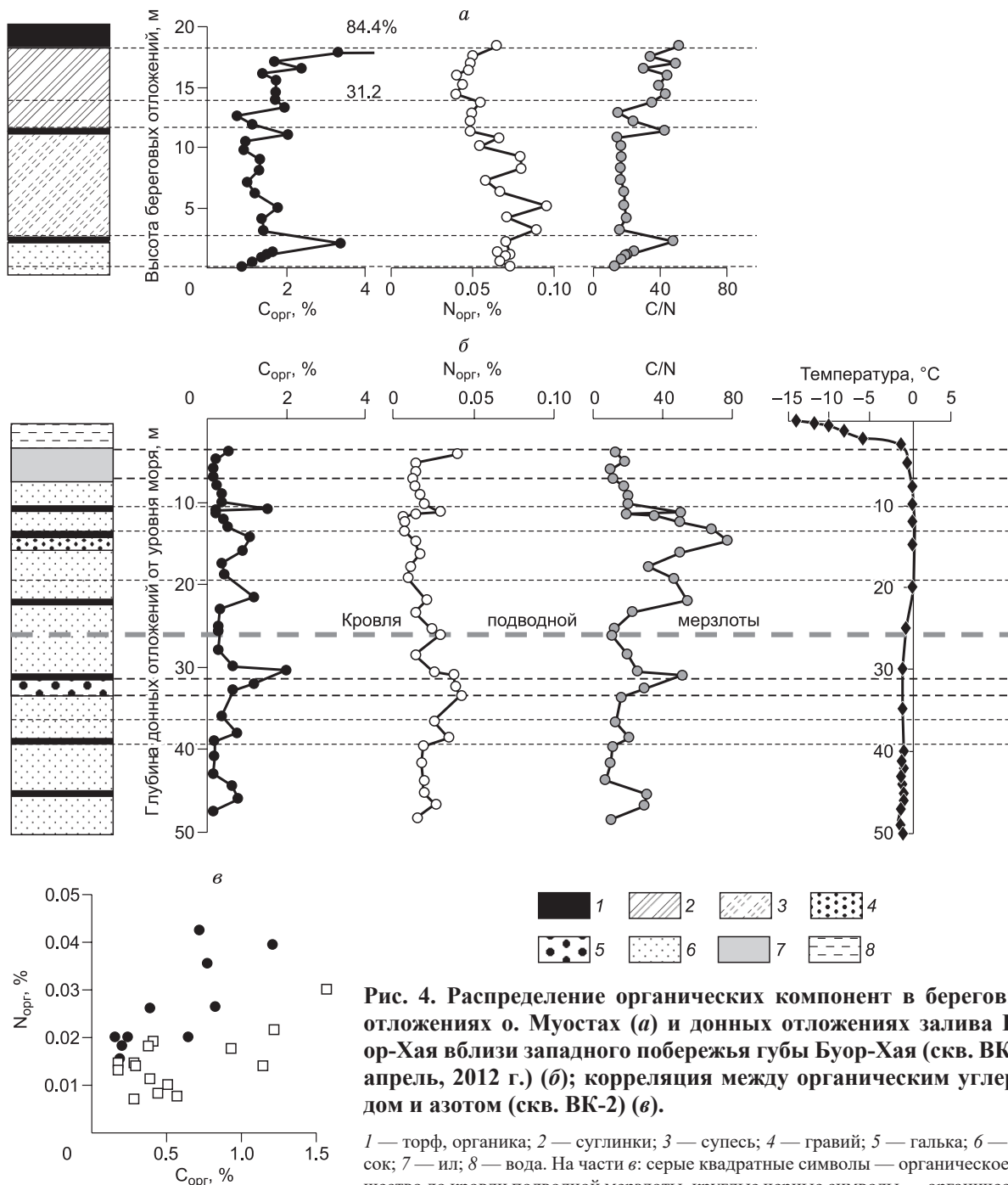
Рис. 3. Распределение  $C_{\text{орг}}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  в береговом обнажении м. Муостах (а) и донных отложениях скважины, расположенной в 17.5 км на северо-восток от о. Муостах (б) (скв. 1, апрель, 2011 г.).

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 %  $C_{\text{орг}}$  в суглинках и до 48 %  $C_{\text{орг}}$  в торфе (см. рис. 2—4). Данные изотопии показывают облегченный состав изотопов углерода  $-29 \dots -27 \text{‰}$  (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  $\text{CO}_2$  [Manzoni et al., 2008; Квиткина, 2012]. Высокие потоки  $\text{CO}_2$  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  $C/N = 20\text{—}25$  активизируются микробные процессы образования гумуса и, соответственно, накопления  $C_{\text{орг}}$  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 %  $C_{\text{орг}}$  (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  $-27 \dots -24 \text{‰}$  (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  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$   $-24.0 \dots -23.5 \text{‰}$  определен в прибрежных песках при  $C_{\text{орг}}$  0.7—0.9 %. В песках на урезе моря — еще почти на порядок меньше 0.05—0.09 %  $C_{\text{орг}}$ . 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.).

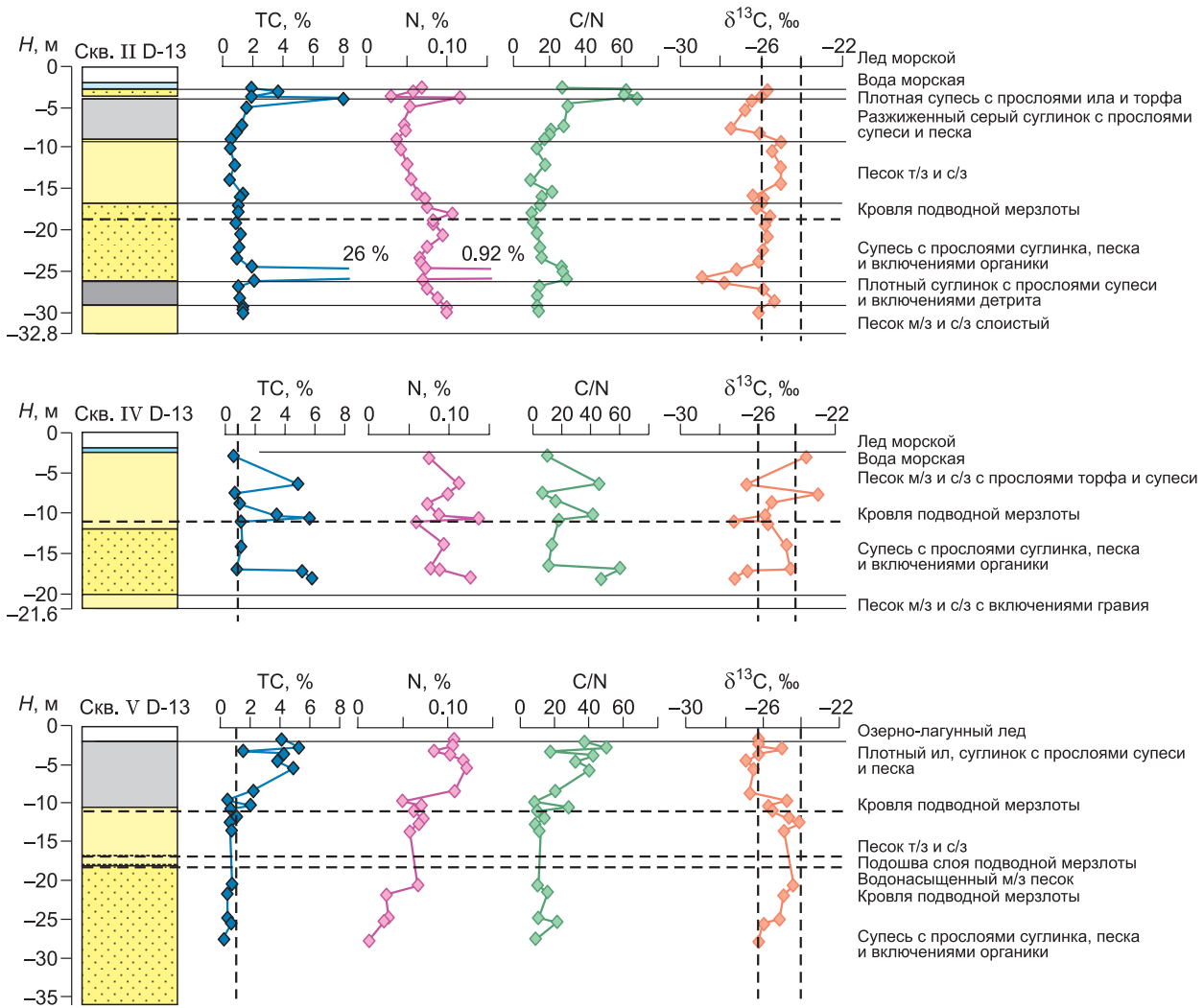


Рис. 6. Распределение органических компонент в донных отложениях морских скважин по профилю от северного мыса о. Муостах к Быковскому полуострову (скв. II, IV D-13) и скважины в центре лагуны на Быковском полуострове (скв. V D-13).

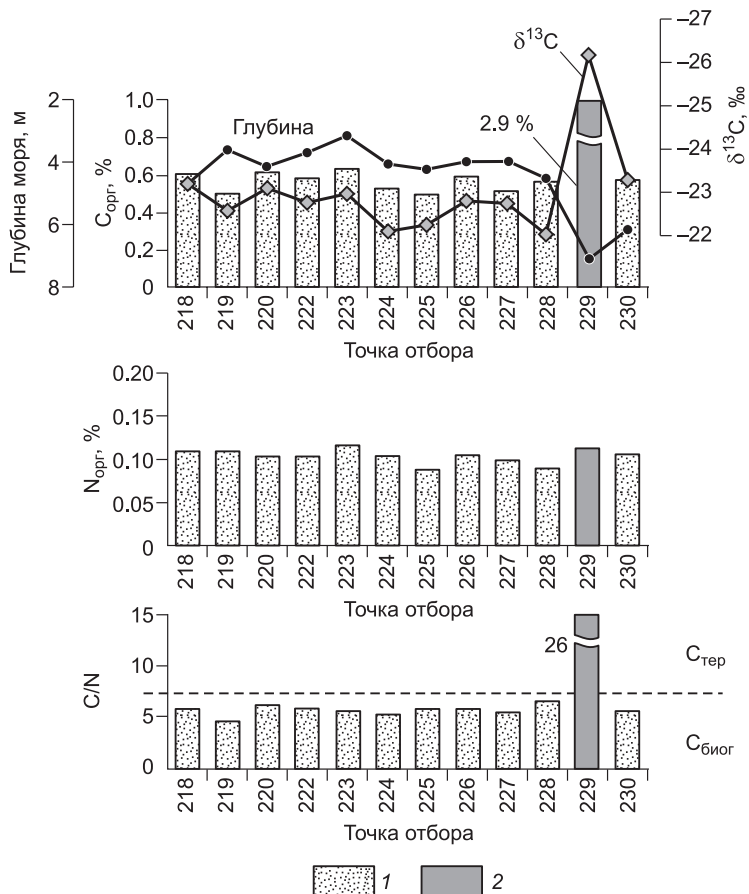


[Xu et al., 2009] показали, к тому же, высокую доступность к микробной деградации органического вещества, связанного с песками. Описанные процессы сопровождаются снижением соотношения C/N и утяжелением  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ . Наши данные также указывают на микробную деградацию  $\text{C}_{\text{орг}}$  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 полужамкнутых 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 термомоденационных 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/м<sup>3</sup>), при этом первичная продукция достигает 800 мг C/(сут·м<sup>2</sup>), 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  $\text{C}_{\text{орг}}$  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  $\text{C}_{\text{орг}}$  позволяют говорить об увеличении поступления органического вещества в осадки в современных условиях.

Залегающие 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 прослой древесного детрита) содержание органического углерода очень низкое (0.2—0.4 %  $\text{C}_{\text{орг}}$ ) и достаточно однородно до самого забоя. Включения древесного детрита увеличивают содержания  $\text{C}_{\text{орг}}$  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  $\text{CO}_2$  в атмосферу, в анаэробных – увеличить насыщение  $\text{CH}_4$  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., Дмитревский 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., Kruhmalev 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 fluviually 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.*

## Input of organic matter to the Buor-Khaya Gulf (*Laptev Sea*)

T.V. Pogodaeva<sup>a,\*</sup>, T.V. Khodzher<sup>a</sup>, N.A. Zhuchenko<sup>a</sup>, M.N. Grigoriev<sup>b</sup>,  
V.S. Panov<sup>c</sup>, G.T. Maksimov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Ulan-Batorskaya 3, 664033, Russia*

<sup>b</sup> *Melnikov Permafrost Institute, ul. Merzlotnaya 36, Yakutsk, 677010, Russia*

<sup>c</sup> *Institute of Archeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, pr. Akad. Lavrentieva 17, Novosibirsk, 630090, Russia*

Received 27 October 2015; accepted 6 July 2016

### Abstract

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%. 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.

© 2017, V.S. Sobolev IGM, Siberian Branch of the RAS. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

**Keywords:** bottom sediments; organic carbon; organic nitrogen; carbon isotopes; nitrogen isotopes; Arctic; Laptev Sea

### Introduction

In recent years, the forecasted climate warming in Arctic has triggered great interest to data on the input of organic carbon, the source of greenhouse gases, to the Arctic basin (Achberger et al., 2013; Bense et al., 2009; Frey and McClelland, 2009; Guo and Macdonald, 2006; Gustafsson et al., 2011; Naidu, 1985; Richter-Menge and Overland, 2010; Romankevich and Vetrov, 2001; Schuur et al., 2008). Solid river and coastal runoff was established to be the major terrigenous source of organic carbon for Arctic seas (Are, 1999; Charkin et al., 2011; Eicken, 2004; Grigoriev, 2004; Grigoriev and Kunitzkii, 2000; Grigoriev and Rachold, 2003; Grigoriev et al., 2001, 2004a; Guo et al., 2007; Rachold et al., 2000, 2004; Reimnitz et al., 1988; Shuiskii, 1983; Stein and Macdonald, 2004). The large part of the Arctic coast, especially in the east of the Russian Federation, is formed by glacial rocks (so-called glacial complex) and deposits of thermokarst depressions (Grigoriev, 2004; Grigoriev and Kunitzkii, 2000; Grigoriev and Rachold, 2003; Grigoriev et

al., 2001, 2004b). They are rich in organic carbon owing to the presence of abundant plant remains, e.g., peat accumulations. The active erosion of the coast, particularly the glacial complex, resulted in suspension flows on the large part of the nearby shelf, which are well visible in satellite images (<http://www.visibleearth.nasa.gov>). Coastal sediments (and organic carbon) are supplied by bottom currents to deep sea zones as suspensions and bottom material, in compliance with the bathimetric parameters and relief of the bottom. According to Rekant (2001) and Treshnikov and Sal'nikov (1985), the main waterways involved in the transportation of most of the bottom sediments are paleoriver valleys formed during the Zyryanian, Sartanian, and preceding sea regression.

The Buor Khaya Gulf located in the central part of the Laptev Sea is the best object for studying the above processes. The solid runoff of the long Siberian Lena River here forms an underwater extension of its delta. About a third of the gulf coast is steep cliffs up to 40 m in height, composed of the glacial-complex rocks. The latter are intensively eroded by thermal abrasion, whose rate reaches 10–20 m/year, as, for example, on Muostakh Island (Grigoriev and Kunitzkii, 2000). In recent 10–15 years, the rate of the glacial-coast disintegration has considerably increased (Grigoriev et al., 2006). The reason is an increase in the regional summer surface air

\* Corresponding author.

E-mail address: [tatyana@lin.irk.ru](mailto:tatyana@lin.irk.ru) (T.V. Pogodaeva)

temperature, a slight increase in the thickness of seasonally thawing layer on the coastal slopes, and growth of the storm activity in Arctic because of the considerable expansion of the water area zone free of close ice in summer.

The Lena delta also has a glacial coast; the average annual rate of the coast retreat there is 2–3 m/year (Grigoriev, 1993). Terrigenous material supplied to the sea water area contains much organic matter (OM). The coast erosion intensifies the flow of this material. It is necessary to elucidate the distribution of OM throughout the coastal area and the regularities of its distribution and deposition on the coastal shelf.

## Materials and methods

Field works on the coast and shelf of the Buor-Khaya Gulf of the Laptev Sea were carried out by the Permafrost Institute (Yakutsk) in 2010–2013 (Fig. 1). Drilling for studying bottom sediments in the central zone of the gulf was performed by the researchers from this institute together with their colleagues from the Pacific Oceanological Institute (Vladivostok), Moscow State University, and Alfred-Wegener-Institut für Polar-und Meeresforschung (Bremerhaven, Germany).

In August of 2010, 137 samples of surface sediments were taken along seven profiles in the thermal-abrasion zone of the western coast of the Buor-Khaya Peninsula. This zone is formed by rocks with thick wedge ice. In each profile, the samples were collected in the coastal zone and within a continental slope, at 10 km from the coast. Some samples were taken in the Orto-Stan River and its mouth.

In April of 2011, drilling from marine ice on the coastal shelf penetrated a 50 m thick section of bottom ground at a distance of 17.5 km to the northeast from Muostakh Island (71°41'33.4" N, 130°22'00.2" E). Sixty-two samples were taken from the extracted bottom sediment core. Eleven samples were collected in the coastal deposit exposure on Cape Muostakh (Bykovskii Peninsula) (71°42'18.67" N, 129°35'45.57" E).

In April 2012, a core of thawed and permafrost bottom sediments was extracted from the 50 m long column of the well drilled near the western coast of the Buor-Khaya Gulf (71°25'20.4" N, 132°05'04.9" E). Thirty-four samples were taken from this core.

In August of 2012, twenty-eight samples of surface deposits were taken from a 19 m high sea cliff of Muostakh Island (on its northeastern coast), formed by a rock complex with thick wedge ice, and from the adjacent beach (section M-11-2012, 71°35'41.9" N, 129°59'41.7" E) (Fig. 1).

In April of 2013, two wells were drilled along the profile running from the northern cape of Muostakh Island to the Bykovskii Peninsula (Fig. 1), 30 m deep well II D-13 and 20 m deep well IV D-13, and 23 and 12 samples, respectively, were taken from them. Also, a 40 m deep well V D-13 was drilled on the Bykovskii Peninsula, at the center of the Ivashka lagoon, a former thermokarst lake subject to the sea influence. Eighteen samples were taken from its bottom deposits.

In August of 2013, the bottom surface ground was sampled in the strait west of Muostakh Island (Fig. 1). The samples were examined by different analytical methods, including analysis for organic carbon, nitrogen, and C/N.

The contents of total organic carbon (TOC) and total organic nitrogen (TON) were determined in the certified Laboratory of Hydrochemistry and Atmosphere Chemistry (Certificate ROSS RU. 0001.513855) of the Limnological Institute, Irkutsk. The analyses were made by catalytic high-temperature oxidation of samples at 950 °C, followed by the determination of CO<sub>2</sub> content on a high-temperature Vario TOC cube carbon analyzer with an IR detector. All samples were treated with 10% HCl (prepared from concentrated HCl of high purity and deionized water with TOC < 1 ppb) for removal of carbonates and then were dried at 80 °C to a constant mass (GOST 23740-79). The average over three measurements for a sample was taken as the final result. Standard deviation was no more than 0.01%.

Isotope ratios were measured by gas isotope mass spectrometry at the Institute of Archeology and Ethnography, Novosibirsk. Standard deviation of isotope measurements for the standard sample (citric acid, Aldrich) did not exceed 0.12‰. The average over two measurements for a sample was taken as the final result.

## Results

The littoral zone of the western coast of the Buor-Khaya Peninsula is formed mostly by Pleistocene glacial rocks, which are loams with a high content of organic material (plant remains and peat inclusions). The ice content of the rocks is >50%. The sediments near the water line and in the shoal (a depth of ≤2 m) are medium- and fine-grained sand. The surface bottom sediments at a depth of >2 m are sandy loam. The rock sample from the Orto-San River is sandy loam, and the sample from the mouth zone is sand.

The glacial complex rocks and the deposits of alas depressions of the sea cliffs (sampled along several profiles) contain 0.82–5.8% TOC (loams) and up to 48% TOC (peat intercalates), whereas the sands of the littoral shoal are poor in organic carbon, 0.04–0.18% TOC (Fig. 2). Along all studied sea profiles, the sandy loams replacing sands as the sea deepens (to 7–10 m at a distance of 5–12 km from the coast) have low contents of TOC, 0.14–0.63%, which slightly increase with the sea depth. In sea depressions, the TOC content in sediments reaches 5%. Along all the profiles, high contents of TOC are observed in sediments consisting mostly of fine fractions.

In the 50 m thick bottom sediment section of the well drilled 17.5 km northeast of Muostakh Island, the ~6 m thick upper member is the richest in OM, with the maximum content of TOC (up to 3%) observed in the upper 33 cm thick mud bed (Fig. 3b). Throughout the core, the sediments are dark gray silt-argillaceous, with horizontal lamination. Lower in the section, in the horizons lying 18, 23, and 38 m below the sea bottom, there are a few more sediment members rich in OM (up to 2% TOC). The minimum content of OM has been found



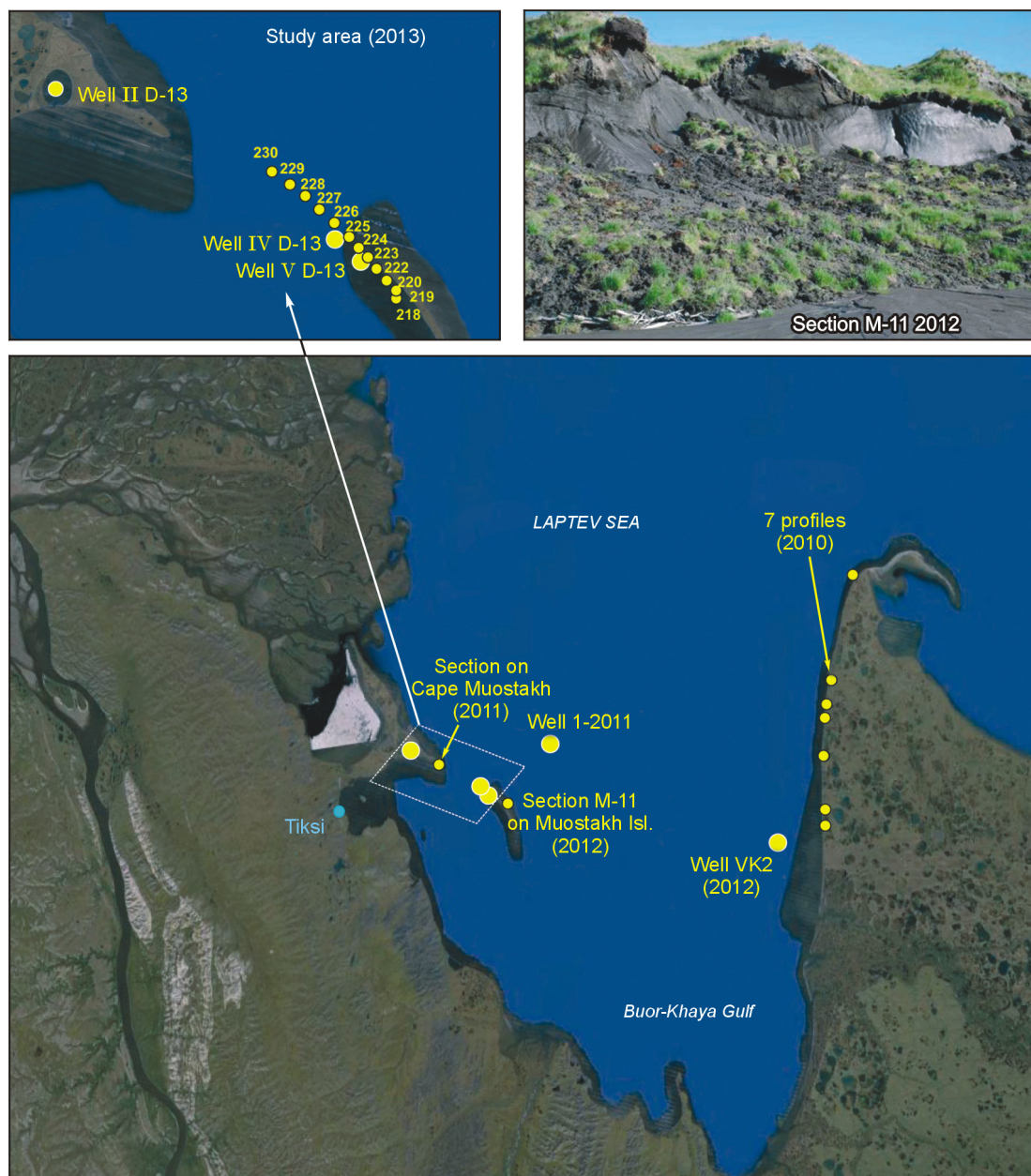


Fig. 1. The Buor-Khaya Gulf of the Laptev Sea. Schematic map of the sampling localities.

in sands (0.09–0.31%). The  $\delta^{13}\text{C}$  value varies from 26‰ in OM-rich beds to 23‰ in the rest. Throughout the section, the marine sediments are salinized and occur in a negative-temperature zone (–0.3 to –1 °C).

The Bykovskii Peninsula, like most of the sea coast in the study area, is formed by glacial rocks and fine-grained alas deposits. The composition of deposits changes from sand at the sea edge to peaty loam at a height of 25 m. They are rich in OM: The average TOC content is ~3%, reaching 13% in the upper part of the section (Fig. 3a). The  $\delta^{13}\text{C}$  value varies from 29‰ in peaty sandy loam to 23‰ in sand.

In the coastal zone of Muostakh Island (Fig. 4a), the maximum content of TOC has been found in peat (84.4%) and peaty sandy loams (31.2%) at the top of the scarp. The scarp and coastal sands are poor in TOC (0.76–1.73%). The

content of TON is 0.04–0.09% and depends on the amount of OM admixture, i.e., is in correlation with the TOC content. The C/N ratio varies from 15 (in sand) to 50.

In the 50 m thick bottom sediment column of the well drilled near the western coast of the Buor-Khaya Gulf, the maximum contents of TOC and TON are found in intercalates rich in OM and woody detritus, 0.7–2.0 and 0.02–0.04%, respectively (Fig. 4c). In sands their contents are 0.16–0.40 and 0.007–0.015% and do not seriously change with depth. The C/N ratio is 10–78, as in sands of the coastal scarps, with the maximum value observed in intercalates rich in OM (particularly woody detritus).

We studied the distribution of TOC and TON contents throughout the 30 and 20 m thick well sections along the profile from the northern cape of Muostakh Island to the

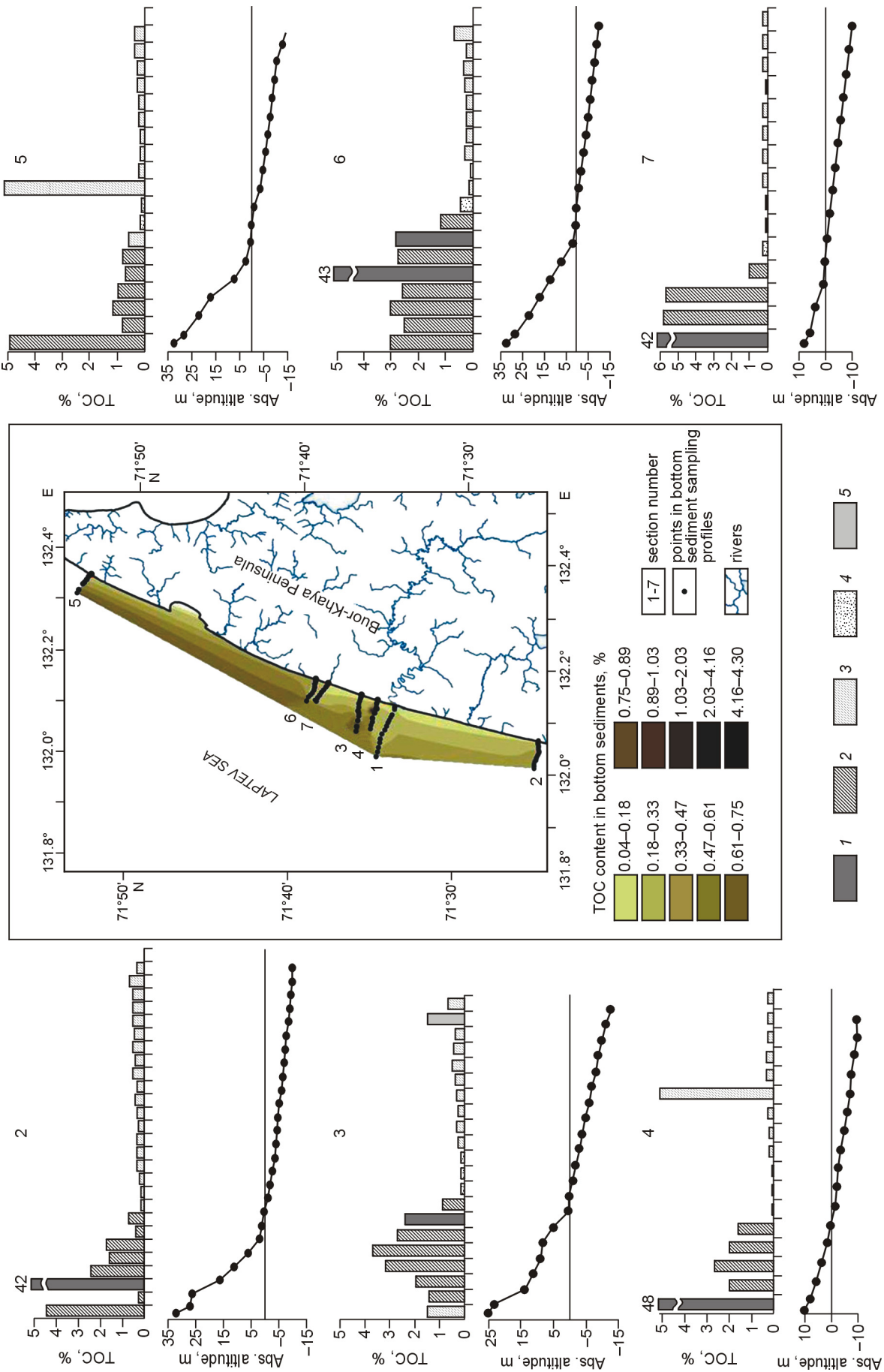


Fig. 2. Distribution of TOC contents in slope deposits on the western coast of the Buor-Khaya Peninsula and in bottom sediments of the Buor-Khaya Gulf. 1, peat; 2, loam; 3, sandy loam; 4, sand; 5, mud.

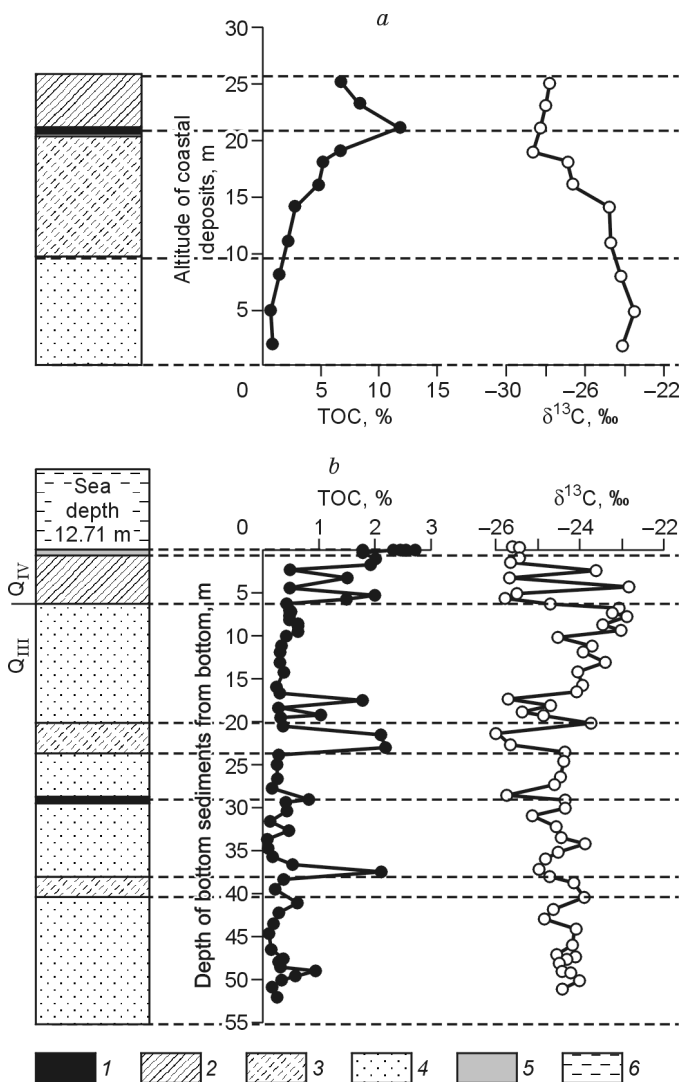


Fig. 3. Distribution of TOC contents and  $\delta^{13}C$  in the coastal deposit exposure on Cape Muostakh (a) and in bottom sediments of well 1 drilled 17.5 km northeast of Muostakh Island in April of 2011 (b). 1, peat; 2, loam; 3, sandy loam; 4, sand; 5, mud; 6, water.

Bykovskii Peninsula (wells II D-13 and IV D-13). They are high in the upper finely dispersed deposits (up to 8% TOC and 0.13% TON), decrease in the underlying loams, and are minimum in sands (Fig. 5). Extremely high contents of TOC (up to 26%) and TON (0.92%) are found in intercalates with OM (peat and woody detritus) inclusions. The C/N ratio is 15–25, sometimes reaching 70 in OM-rich intercalates.

In the surface ground in the strait west of Muostakh Island, TOC = 0.49–0.63%, TON = 0.09–0.11%, and C/N ratio varies from 4.8 to 6.3. In general, the OM content depends on the bottom relief in the strait. In the depression with the sea depth of 7 m, the content of TOC is 2.9%, C/N = 26.

## Discussion

The coastal glacial-rock deposits of the Buor-Khaya Gulf rim it almost entirely in the east (Buor-Khaya Peninsula) and partly in the southwest (Bykovskii Peninsula and Muostakh

Island). They show the general regularities of OM distribution and a clear dependence of OM content and quality on the sea level altitude, land relief, and deposit grading. The coast is formed mainly by steep cliffs with absolute altitudes of 25–30 m. They are composed of loams with peat intercalates containing massive wedge ice and are occupied by vegetation. These strata have the maximum contents of TOC: 3–12% in sandy loams and up to 48% in peat (Figs. 2–4). The light carbon isotope composition,  $-29$  to  $-27$ ‰ (Fig. 3), reflects (Sánchez-García et al., 2011; Vonk et al., 2010a,b, 2012; Xu et al., 2009) the contribution of fresh OM (fresh vegetation) and OM of the upper layer of the Arctic permafrost soils. The soils have an abnormally high C/N ratio (25–50) because of the extremely high content of TOC and extremely low content of TON (Fig. 4). These high values are probably due to the abundance of peat in the strata and mark the contribution of undegraded OM (plant remains) (Kaverin and Pastukhov, 2013). The C/N ratio in such deposits can reach 80 and more (Kovda and Rozanov, 1988; Novikov and Kisarov, 2012). It is an important parameter indicating the route of OM transformation. At high C/N ratio, nitrogen becomes immobile, and OM degrades with the formation and emission of  $CO_2$  (Kvitkina, 2012; Manzoni et al., 2008). Intense  $CO_2$  flows in the studied zones were observed by Vonk et al. (2010a, 2012). During the transformation of OM, it becomes enriched with nitrogen, and C/N decreases. At C/N = 20–25, active microbial processes of humus formation and TOC accumulation run in the deposits (Fig. 4).

The deposits near the base of the glacial complex and the sediments of alas thermokarst depressions are mostly loams and sandy loams. They also have high TOC contents, 1–5% (Figs. 2–4). The C/N ratio is stable, 18–20, despite the variations in nitrogen and carbon contents; these values are typical of the Arctic permafrost strata (Kaverin and Pastukhov, 2013; Naidu, 1985; Xu et al., 2009). The carbon isotope composition is heavier,  $-27$  to  $-24$ ‰ (Fig. 3), and corresponds to old carbon in the Pleistocene sediments (Vonk et al., 2010a, 2012). The carbon isotope composition becomes heavier with a decrease in the content of TOC (correlation factor  $R = 0.85$ ) and the absolute altitude of the sampled horizons ( $R = 0.83$ ). The latter dependence is probably due to the change in the granulometric composition of the deposits. The heaviest carbon isotope ( $\delta^{13}C = -24$  to  $-23.5$ ‰) was found in the littoral sands with TOC = 0.7–0.9%. The sands of the sea water line have an order of magnitude lower TOC contents (0.05–0.09%). Recent experimental studies (Shinkarev et al., 2013) have confirmed a relationship between the real structure of clay minerals with a labile crystal lattice and the binding of OM into a form resistant to oxidation destruction in the course of sediment transformation during the formation of soils. The authors showed that under equal conditions (temperature and humidity), the lithogenetic basis of mineral substrates of different compositions significantly contributes to the intensity of mineralization and humification processes, transformation of humification products, and increase in their stability. The resistance of OM (particularly, old OM bound with finely dispersed clay particles) to degradation was

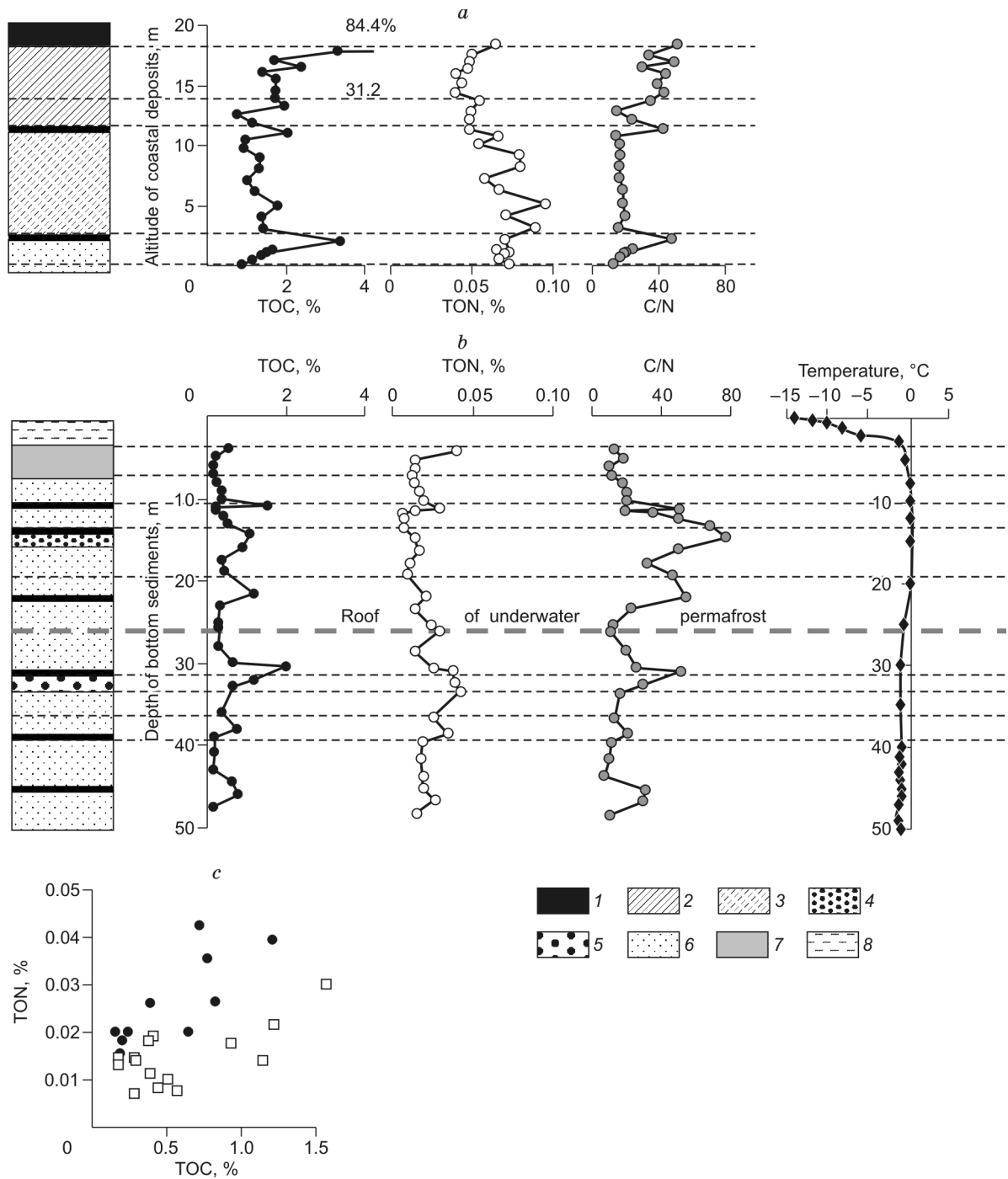


Fig. 4. Distribution of organic components in the coastal deposits of Muostakh Island (a) and in the bottom sediments near the western coast of the Buor-Khaya Gulf (well VK-2, April, 2012) (b); correlation between TOC and TON contents (well VK-2) (c). In c: light squares mark OM in the sediments from sea level to the roof of submarine permafrost, and black circles mark OM of the permafrost bed. 1, peat; 2, loam; 3, sandy loam; 4, gravel; 5, pebble; 6, sand; 7, mud; 8, water.

reported earlier by Karlsson et al. (2011) and Xu et al. (2009). Moreover, the latter authors showed that OM bound with sands is highly accessible to microbes, which cause its degradation. During these processes, the C/N ratio in OM decreases and  $\delta^{13}\text{C}$  becomes heavier. Our data also point to microbial degradation of OM in the sands near the sea water line and confirm the conclusions of Vonk et al. (2012) about the partial degradation of thawed OM supplied into the gulf water.

The distribution of OM in the bottom sediments of the beach zones and continental slope was studied in seven sections along the western coast of the Buor-Khaya Peninsula (Fig. 2). Sands at the water line, most actively reworked, have the minimum content of TOC (0.05–0.09%). The TOC content increases (from 0.10 to 0.63%) as the sea deepens to 7–10 m at 5–12 km from the coast, which is due to the increase in the portion of easily transferable finely dispersed material



Fig. 5. Core from the sea well VK-2 (April, 2012), composed of compact laminated sand with abundant plant detritus.

deposited at greater sea depths. The closed or semiclosed bottom depressions within the continental slope contain the most finely dispersed material with  $\text{TOC} \leq 5\%$ . Sorting of OM transferred into the gulf begins in the shallow zone of the continental slope as a result of the active transformation of bottom sediments in the periods of storm activity. Light OM fractions (humic compounds) (Karlsson et al., 2011; Vonk et al., 2010a,b) move to the water surface. Fractions of old OM bound with heavier mineral particles settle: The coarsest ones settle most closely to the coast. Organic material bound with finely dispersed clay particles is transferred by turbid flows into the deepest zone of the water area, to the foot of the continental slope. The TOC anomalies in the slope deposits are due to the removal of large OM masses by minor rivers draining the watershed areas with widespread OM-containing rocks (Pleistocene glacial complex and sediments of Holocene thermokarst depressions). In the mouth zones, the deposits bordering the sea area contain up to 4% TOC.

According to our data ( $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ ,  $\text{N} = 0.05\%$ ,  $\text{C/N} = 25$ ) (Figs. 3, 4, and 6), the OM of the surface gulf sediments is mostly terrigenous, which agrees with the data of Karlsson et al. (2011). The only site of the gulf where biogenic OM ( $\delta^{13}\text{C} = -22.5\text{‰}$ ,  $\text{N} = 0.1\%$ ,  $\text{C/N} = 5.5$ ) prevails in the surface sediments (Fig. 7) is the strait between the Muostakh and Bykovskii Peninsulas with active thermal abrasion and thermal denudation. Here, not far from the site where the Bykovskii stream of the Lena delta flows into the sea, the water is the most turbid (122 mg/L suspension) (Charkin et al., 2011): Its chlorophyll content is three times higher than the average over the gulf (6.7 mg/m<sup>3</sup>) (Vetrov et al., 2008); the primary production of carbon reaches 800 mg/(day·m<sup>2</sup>), which is eight times higher than the average of the Laptev Sea. The primary production of carbon is the material and energetic basis for all subsequent stages of the production process and ensures the total biologic productivity of a water reservoir (Vinberg, 1960).

Drilling of several 30–50 m deep wells in the gulf water area permitted a detailed evaluation of OM distribution throughout the bottom sediments. It showed a clear dependence of the OM content and quality on the sediment fraction.

Accumulation and change of sediments of different granulometric compositions depend on the depositional environments, e.g., sea transgressions and regressions. The obtained data on the cores of bottom (thawed and permafrost) rocks agree with the results of reconstruction of the Laptev Sea shelf flooding (Bauch et al., 2001). All well cores sampled in different gulf zones (coastal, island, and central) have an upper 5–6 m thick bed of silted Holocene sediments. As the sea deepens, the portion of silt–clay fraction increases to 55% (Chuvilin et al., 2013). This is due to the transfer of finely dispersed clay particles as turbid flows into the deeper zone of the water area. The TOC content also increases from 0.6 to 2.7% in this direction. The contents of nitrogen and  $\delta^{13}\text{C}$  and C/N values indicate that the OM is terrigenous ( $\delta^{13}\text{C} = -26$  to  $-25\text{‰}$ ) (Fig. 3) and is the ancient organic material released from the glacial complex during its erosion by active coastal processes (Figs. 2–4). It is tightly bound with clay particles and is the most resistant to degradation (Karlsson et al., 2011). The highest contents of mud and TOC are observed in the upper 33 m thick bed of the well 1-2011 in the central zone of the gulf. The continuous occurrence and fine dispersion of this sedimentary bed and its high content of TOC point to the increased input of OM to the recent sediments.

The underlying deposits are rather homogeneous; these are fine- and medium-grained laminated sands with numerous interbeds rich in woody detritus (Figs. 3–5), which is spread down to the well face. The penetrated thick sand unit is of Pleistocene and Pliocene (Buor-Khaya Formation) ages (Grigoriev, 1996). It is formed by continental sediments inundated during the postglacial sea level rise, which ended at ~5 ka (Bauch et al., 2001).

In general, the content of TOC in the sands (except for woody-detritus interbeds) is extremely low (0.2–0.4%) and is nearly constant down to the well face. The woody-detritus and peat interbeds are richer in TOC (up to 2.2 and 6–26%, respectively). Since OM-saturated interbeds are numerous, the content of TOC in the gulf sediments is high. The content of TON is no more than 0.05%, averaging 0.02%. Somewhat higher TOC and TON contents are observed in the sediments near Muostakh Island, which contain more clay dust (Fig. 4).

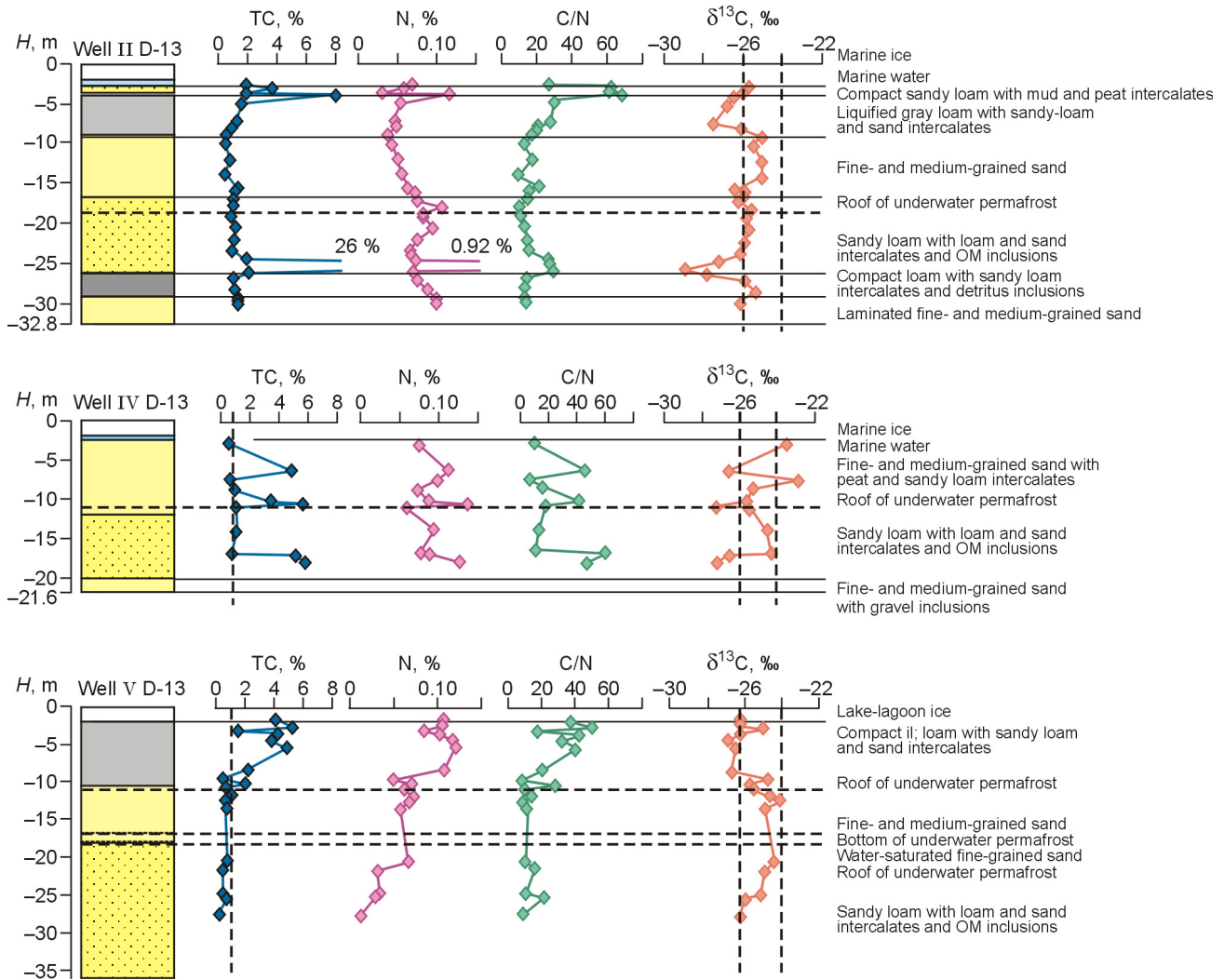


Fig. 6. Distribution of organic components in the bottom sediments of the sea wells II D-13 and IV D-13 drilled along the profile from the northern cape of Muostakh Island to the Bykovskii Peninsula and of the well V D-13 drilled at the center of lagoon on the Bykovskii Peninsula.

The distribution of TOC and TON throughout the section testifies to continental sedimentation (Fig. 3), when nitrogen accumulates because of its immobilization during aerobic degradation of OM. The C/N ratio in the OM also indicates its terrigenous nature. In the sands it is 10–20, which is equal to the ratio determined by us in the coastal deposits and is typical of the Arctic permafrost deposits (Naidu, 1985; Xu et al., 2009). In the numerous zones rich in woody detritus and OM, the C/N ratio is high (30–80), as in the coastal deposits, and reflects the contribution of undegraded coastal material (remains of higher terrestrial plants). A different distribution of OM is observed in the sediment core from the Ivashka lagoon (former thermokarst lake). The content of TON here decreases with depth because of the rapid decomposition of nitrogen-containing organic compounds in the subaqueous depositional environment.

According to the carbon isotope composition, the OM of the sediments from all studied gulf wells is terrigenous ( $\delta^{13}\text{C} = -30$  to  $-23\text{‰}$ ). It is divided into three groups: 1—plant detritus, peat, and undegraded (but capable for degradation)

OM ( $\delta^{13}\text{C} = -30$  to  $-26\text{‰}$  at  $\text{C/N} = 20\text{--}80$ ); 2—partly degraded (but highly resistant to further degradation) OM bound with clays ( $\delta^{13}\text{C} = -26$  to  $-25\text{‰}$  at  $\text{C/N} = 15\text{--}20$ ); and 3—degraded (and capable for further degradation) OM bound with sands ( $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$  to  $-23\text{‰}$  at  $\text{C/N} = 10\text{--}20$ ) (Karlsson et al., 2011; Xu et al., 2009).

Coarse-grained deposits rich in terrigenous OM (remains of higher terrestrial plants) are usually gas-producing when they occur at a great depth for a long geologic time (Kim and Rodchenko, 2013; Kontorovich et al., 2013). In our case, the carbon isotope composition of sands becomes heavier near the boundary between compact Holocene muds and underlying older sands (Fig. 3). This might be due to anaerobic microbial digestion of OM in the bottom sediments; moreover, it is the coarse-grained deposits that favor the access of microorganisms to OM (Xu et al., 2009). In anaerobic conditions, microbial degradation of OM leads to the production of methane with a light carbon isotope ( $\delta^{13}\text{C} = -80$  to  $-60\text{‰}$ ) (Zavarzin, 1984), whereas the carbon isotope composition of the microbial biomass varies from  $-22.0$  to  $-18.5\text{‰}$  (Ivanov

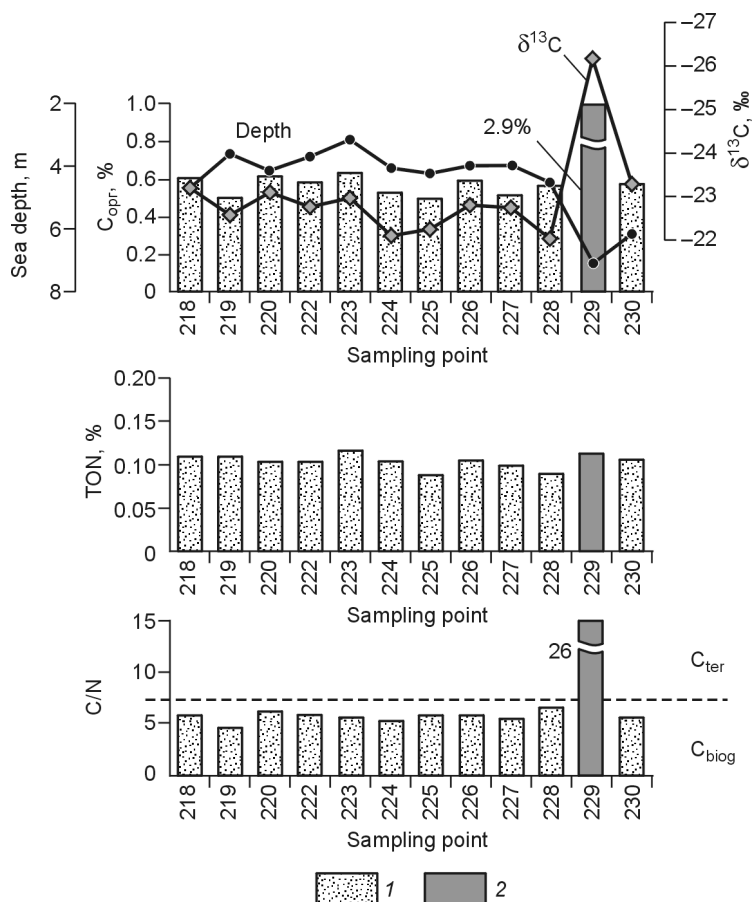


Fig. 7. Distribution of organic components in the surface sediments of the strait between Muostakh Island and the Bykovskii Peninsula (April of 2013). 1, sands; 2, loams.

et al., 2012; Lein et al., 2012). Thus, the total  $\delta^{13}\text{C}$  value of OM shifts toward the heavy isotope composition. Drilling revealed biogenic methane in ultrahigh concentrations here (Sergienko et al., 2010, 2012). Taking into account the high survival of Arctic microorganisms at low temperatures and the high microbial activity in thawed sediments (Sánchez-García et al., 2011), we suggest the degradation of OM with the production of methane above the roof of submarine permafrost rocks here. This process calls for comprehensive study.

## Conclusions

We have established that the coastal deposits of the Buor-Khaya Gulf of the Laptev Sea are rich in organic carbon (up to 80%).

The OM supplied into the gulf waters during the thermoabrasive destruction of the sea coast does not accumulate ( $\text{TOC} \leq 0.6\%$ ) but is transferred with lighter sediment fractions to the central zone of the gulf ( $\text{TOC} = 2.7\%$ ) and then to the foot of the continental slope.

The distribution of TOC contents throughout the sedimentary sections of the studied wells shows their maximum values (2.7%) in the upper finely dispersed deposits, lower values in the underlying sandy loams, and minimum values in the lowermost sands.

The continuous occurrence of the 33 cm thick surface bed of bottom sediments, the fine dispersion of its rocks, and their high TOC content testify to the increased present-day input of OM to the sediments.

We have also established that degradation of OM in thawed permafrost strata is possible and actually takes place today. Under subsequent climatic warming, this might intensify the emission of  $\text{CO}_2$  into the atmosphere in aerobic conditions and increase the enrichment of the bottom sediments with  $\text{CH}_4$  in anaerobic conditions.

This work was supported by Program 23.9 from the Presidium of the Russian Academy of Sciences.

## References

- 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., 2013. State of the climate in 2012. Bull. Am. Meteorol. Soc. 94 (8), pp. 1–238.
- Are, F.E., 1999. The role of coastal retreat for sedimentation in the Laptev Sea, in: Land–Ocean Systems in the Siberian Arctic. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 287–295.
- Bauch, H.A., Kassens, H., Naidina, O.D., 2001. Composition and flux of Holocene sediments on the eastern Laptev Sea shelf, Arctic Siberia. Quat. Res. 55 (3), 344–351.

- Bense, V.F., Ferguson, G., Kooi, H., 2009. Evolution of shallow groundwater flow systems in areas of degrading permafrost. *Geophys. Res. Lett.* 36, L22401, doi:10.1029/2009gl039225.
- Charkin, A.N., Dudarev, O.V., Semiletov, I.P., Krumhalev, A.V., Vonk, J.E., Sánchez-García, L., Karlsson, E., Gustafsson, Ö., 2011. 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.* 8, 1917–1946, doi:10.5194/bgd-8-1917-2011.
- Chuvilin, E.M., Bukhanov, B.A., Tumskey, V.E., Shakhova, N.E., Dudarev, O.V., Semiletov, I.P., 2013. Thermal conductivity of bottom sediments in the region of Buor-Khaya Bay (shelf of the Laptev Sea). *Earth Cryosphere* 17 (2), 32–40.
- Eicken, H., 2004. The role of Arctic sea ice in transporting and cycling terrigenous organic matter, in: Stein, R., Macdonald, R.W. (Eds.), *Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 45–53.
- Frey, K.E., McClelland, J.W., 2009. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry. *Hydrol. Processes* 23, 169–182, doi:10.1002/hyp.7196.
- Grigoriev, M.N., 1993. Cryomorphogenesis in the Lena River Mouth [in Russian]. Institut Merzlotovedeniya SO RAN, Yakutsk.
- Grigoriev, M.N., 1996. Regularities of thermal abrasion and thermal denudation of the Arctic sea coasts (by the example of the major sites of the Laptev Sea), in: *Proceedings of the First Conference of Russian Geocryologists. Book 1, Part 3. Dynamic Geocryology [in Russian]*. MGU, Moscow, pp. 504–511.
- Grigoriev, M.N., 2004. Recent cryogenic geologic and geomorphologic processes in the Arctic littoral zone of Asia: dynamics and alluvial flows, in: *Modern Geodynamics and Dangerous Natural Processes in Central Asia [in Russian]*. Irkutsk, Issue 1, pp. 102–111.
- Grigoriev, M.N., Kunitskii, V.V., 2000. Glacial complex of the Arctic coast of Yakutia as a source of the shelf drift, in: *Hydrometeorological and Biogeochemical Explorations in the Arctic. Proceedings of the Arctic Regional Center [in Russian]*. Dal'nauka, Vladivostok, pp. 109–116.
- Grigoriev, M.N., Rachold, V., 2003. The degradation of coastal permafrost and the organic carbon balance of the Laptev and East Siberian Seas, in: *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, 21–25 July 2003, Zurich*. A.A. Balkema, Lisse, Vol. 1, pp. 319–324.
- Grigoriev, M.N., Rachold, V., Are, F.E., Hubberten, H.-W., Razumov, S.O., Schneider, W., 2001. Coastal dynamics in the western Laptev Sea, in: *Reports on Polar Research. Russian–German cooperation. System Laptev Sea 2000: The Expedition Lena 2000*. Bremerhaven, Vol. 388, pp. 54–59.
- Grigoriev, M.N., Rachold, V., Hubberten, H.W., Schirmeister, L., 2004a. Organic carbon input to the Arctic Sea through coastal erosion, in: Stein, R., Macdonald, R.W. (Eds.), *Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean: Present and Past*. Springer Verlag, Berlin, pp. 41–47.
- Grigoriev, M.N., Vasiliev, A.A., Rachold, V., 2004b. Siberian Arctic coasts: sediment and organic carbon fluxes in connection with permafrost degradation. *Eos Trans. AGU* 85 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract C13A-0261.
- Grigoriev, M.N., Razumov, S.O., Kunitskiy, V.V., Spektor, V.B., 2006. Dynamics of the Russian East Arctic Sea coast: major factors, regularities and tendencies. *Earth Cryosphere* 10 (4), 74–94.
- Guo, L.D., Macdonald, R.W., 2006. Source and transport of terrigenous organic matter in the upper Yukon River: Evidence from isotope ( $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{14}C$ , and  $\delta^{15}N$ ) composition of dissolved, colloidal, and particulate phases. *Geophys. Res. Lett.* 20, Gb2011, doi:10.1029/2005gb002593.
- Guo, L.D., Ping, C.L., Macdonald, R.W., 2007. Mobilization pathways of organic carbon from permafrost to arctic rivers in a changing climate. *Geophys. Res. Lett.* 34, L13603, doi:10.1029/2007gl030689.
- Gustafsson, O., van Dongen, B.E., Vonk, J.E., Dudarev, O.V., Semiletov, I.P., 2011. Widespread release of old carbon across the Siberian Arctic echoed by its large rivers. *Biogeosciences* 8, 1737–1743, doi:10.5194/bg-8-1737-2011.
- Ivanov, M.V., Lein, A.Yu., Zakharova, E.E., Savvichev, A.S., 2012. Carbon isotopic composition in suspended organic matter and bottom sediments of the East Arctic seas. *Microbiology* 81 (5), 596–605.
- Karlsson, E.S., Charkin, A., Dudarev, O., Semiletov, I., Vonk, J.E., Sánchez-García, L., Andersson, A., Gustafsson, Ö., 2011. Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of terrestrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea. *Biogeosciences* 8, 1865–1879, doi:10.5194/bg-8-1865-2011.
- Kaverin, D.A., Pastukhov, A.V., 2013. Genetic characteristics of permafrost soils of exposed spots on flat-hummocky peat bogs of the Bol'shaya Zemlya tundra. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN* 15 (3), 55–62.
- Kim, N.S., Rodchenko, A.P., 2013. Organic geochemistry and petroleum potential of Jurassic and Cretaceous deposits of the Yenisei–Khatanga regional trough. *Russian Geology and Geophysics (Geologiya i Geofizika)* 54 (8), 966–979 (1236–1252).
- Kontorovich, A.E., Kontorovich, V.A., Ryzhkova, S.V., Shurygin, B.N., Vakulenko, L.G., Gaideburova, E.A., Danilova, V.P., Kazanenkov, V.A., Kim, N.S., Kostyreva, E.A., Moskvina, V.I., Yan, P.A., 2013. Jurassic paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Russian Geology and Geophysics (Geologiya i Geofizika)* 54 (8), 747–779 (972–1012).
- Kovda, V.A., Rozanov, B.G., 1988. *Soil Science [in Russian]*. Vysshaya Shkola, Moscow.
- Kvitkina, A.K., 2012. Decomposition of glucose, cellulose, and lignin in mineral substrate depending on C/N, in: *Proceedings of the Sixth Meeting of the Dokuchaev Soil Science Society, Petrozavodsk–Moscow, 13–18 August 2012 [in Russian]*. Moscow, pp. 137–139.
- Lein, A.Yu., Kravchishina, M.D., Politova, N.V., Savvichev, A.S., Veslopolova, E.F., Mitskevich, I.N., Ul'yanova, N.V., Shevchenko, V.P., Ivanov, M.V., 2012. Transformation of particulate organic matter at the water-bottom boundary in the Russian Arctic seas: Evidence from isotope and radioisotope data. *Lithol. Mineral Resour.* 47 (2), 99–128.
- Manzoni, S., Jackson, R., Trofymow, J., Porporato, A., 2008. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. *Science* 321 (5889), 684–686, doi:10.1126/science.1159792.
- Naidu, A.S., 1985. Organic carbon, nitrogen, and C/N ratios of deltaic sediments, North Arctic Alaska, in: *Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers. SCOPE 58, Mitt. Geol.-Palaeontol. Inst. Univ., Hamburg*, pp. 311–321.
- Novikov, A.A., Kisarov, O.P., 2012. Substantiation of the role of root and crop residues in agroecosystems. *Nauchnyi Zhurnal KubGAU* 78 (04), 1–10.
- Rachold, V., Grigoriev, M.N., Are, F.E., Solomon, S., Reimnitz, E., Kasens, H., Antonow, M., 2000. Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic shelf seas. *Int. J. Earth Sci.* 89, 450–460.
- Rachold, V., Eicken, H., Gordeev, V., Grigoriev, M., Hubberten, H., Lisitzin, A., Shevchenko, V., Schirmeister, L., 2004. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean, in: Stein, R., Macdonald, R.W. (Eds.), *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 33–55.
- Reimnitz, E., Graves, S.M., Barnes, P.W., 1988. Beaufort Sea coastal erosion, sediment flux, shoreline evolution and the erosional shelf profile. *U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations, Map I-1182-G. VNIIOkeangeologiya, St. Petersburg*, pp. 48–50.
- Rekant, P.V., 2001. Late Pleistocene evolution of the Laptev Sea continental-margin environments, based on analysis of seismoacoustic data, in: *Sedimentologic Processes and Evolution of Marine Ecosystems in Periglacial Sea Zone. Collection of Scientific Papers [in Russian]*. Murmansk, Vol. 2, pp. 91–99.
- Rekant, P.V., 2002. Pleistocene sedimentation and sediment transport on the Laptev Sea Shelf and continental slope, in: *Climate Drivers of the North. Conference Abstracts, May 8–11, Kiel, Germany*, pp. 92–93.
- Richter-Menge, J., Overland, J.E., 2010. *Arctic Report Card 2010*. <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>.
- Sánchez-García, L., Alling, V., Pugach, S., Vonk, J., van Dongen, B., Humborg, C., Dudarev, O., Semiletov, I., Gustafsson, Ö., 2011. Inventories and behavior of particulate organic carbon in the Laptev and East Siberian seas. *Global Biogeochem. Cycles* 25, 172–183, GB2007, doi:10.1029/2010GB003862.
- Romankevich, E.A., Vetrov, A.A., 2001. *Organic-Carbon Cycle in the Russian Arctic Seas [in Russian]*. Nauka, Moscow.
- 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., 2008. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *Bioscience* 58, 701–714, doi:10.1641/b580807.
- Sergienko, V.I., Semiletov, I.P., Shakhova, N.E., 2010. Methane and carbon dioxide emission in the East Siberian shelf, the factor for global climatic changes, in: Proceedings of the Meeting of the Arctic and Antarctic Science Board of the Russian Academy of Sciences, Arkhangel'sk, 31 March–2 April 2010 [in Russian]. Yekaterinburg, pp. 117–136.
- Sergienko, V.I., Lobkovskii, L.I., Semiletov, I.P., Dudarev, O.V., Dmitrievskii, N.N., Shakhova, N.E., Romanovskii, N.N., Kosmach, D.A., Nikol'skii, D.N., Nikiforov, S.L., Salomatin, A.S., Anan'ev, R.A., Roslyakov, A.G., Salyuk, A.N., Karnaukh, V.V., Chernykh, D.B., Tumskoi, V.E., Yusupov, V.I., Kurilenko, A.V., Chuvilin, E.M., Bukhanov, B.A., 2012. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of East Arctic seas as a potential cause of the "Methane Catastrophe": some results of integrated studies in 2011. *Dokl. Earth Sci.* 446 (1), 1132–1137.
- Shinkarev, A.A. (Jr.), Shinkarev, A.A., Giniyatullin, K.G., 2013. Clay–organics interactions in soils as a link of sedimentation process, in: Proceedings of the International Scientific Conference, Kazan, 15–17 October 2013 [in Russian]. Otechestvo, Kazan, pp. 159–161.
- Shuiskii, Yu.D., 1983. Recent Balance of Sea Coast Drifts. ScD Thesis [in Russian]. Moscow.
- Stein, R., Macdonald, R.W., 2004. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Treshnikov, A.F., Sal'nikov, S.S. (Eds.), 1985. The Arctic and Antarctic Oceans [in Russian]. Nauka, Leningrad.
- Vetrov, A.A., Semiletov, I.P., Dudarev, O.V., Peresyarkin, V.I., Charkin, A.N., 2008. Composition and genesis of the organic matter in the bottom sediments of the East Siberian Sea. *Geochem. Int.* 46 (2), 156–167.
- Vinberg, G.G., 1960. Primary Production of Water Reservoirs [in Russian]. Izd. AN BSSR, Minsk.
- Vonk, J.E., van Dongen, B.E., Gustafsson, Ö., 2010a. Selective preservation of old organic carbon fluviually released from sub-Arctic soils. *Geophys. Res. Lett.* 37, L11605, doi:10.1029/2010gl042909.
- Vonk, J.E., Sánchez-García, L., Semiletov, I., Dudarev, O., Eglinton, T., Andersson, A., Gustafsson, Ö., 2010b. Molecular and radiocarbon constraints on sources and degradation of terrestrial organic carbon along the Kolyma paleoriver transect, East Siberian Sea. *Biogeosciences* 7, 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., 2012. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. *Nature* 489 (7414), 137–140, doi: 10.1038/nature11392.
- Xu, C.H., Guo, L.D., Ping, C.L., White, D.M., 2009. Chemical and isotopic characterization of size-fractionated organic matter from cryoturbated tundra soils, northern Alaska. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 114, G03002, doi:10.1029/2008jg000846.
- Zavarzin, G.A., 1984. Bacteria and Composition of the Atmosphere [in Russian]. Nauka, Moscow.

*Editorial responsibility:* V.A. Kashirtsev