

УДК 552.14

ОБСТАНОВКИ СОВРЕМЕННОГО ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ НА ПОДВОДНОМ БЕРЕГОВОМ СКЛОНЕ ГУБЫ БУОР-ХАЯ (МОРЕ ЛАПТЕВЫХ)

Рубан Алексей Сергеевич¹,
ruban@tpu.ru

Дударев Олег Викторович^{1,2},
dudarev@poi.dvo.ru

Мазуров Алексей Карпович¹,
akm@tpu.ru

Панова Елена Владимировна¹,
elenapanova@tpu.ru

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

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

В настоящее время интерес к арктическому шельфу быстро усиливается вследствие его перспективности на углеводородное сырье и другие минеральные ресурсы. Между тем уровень знаний о процессах, протекающих в арктической системе, еще крайне недостаточен. До сих пор существует дефицит данных о природных процессах в криолитозоне, что определяет дискуссионный характер решения многих региональных проблем. В такой обстановке получение любой новой научной информации внесит определенный вклад в познание развития природы Арктики.

Цель работы: выявление особенностей современного осадкообразования и трансформации вещества в береговой зоне арктических морей на основе результатов многолетних наблюдений.

Объекты исследования: взвешенный материал и донные осадки, включая содержание органического углерода (Сорг) и его изотопный состав – как маркеры литодинамики среды современного осадкообразования. Изучались гранулометрический (размерный) состав донных осадков, содержание и изотопный состав органического углерода, оценивался характер пространственно-временной изменчивости распределения взвешенного материала в водной толще.

Выводы: для безледного периода типичны два устойчивых максимума мутности с содержанием взвеси в от 6,5 до 594 мг/л. В направлении от побережья к свалу глубин замещение песчано-алевритовых осадков илами фаций свала глубин, подножья авандельты и термоабразионно-аккумулятивной террасы сопровождается увеличением содержания органического углерода от 0,4 до 5,4 % при зимних значениях 0,6–9,3 %. Изотопный состав углерода органического вещества донных осадков варьировал от –27,9 до –22,7 ‰.

Ключевые слова:

Восточно-Сибирский шельф, море Лаптевых, многолетнемерзлые породы, термоабразия, донные осадки, взвешенный материал, осадкообразование, органический углерод, изотопный состав углерода.

Введение

Восточно-Сибирский шельф характеризуется своеобразной геотектонической позицией на стыке евразийской и североамериканской плит, неоднократными значительными изменениями природной среды в позднем плейстоцене и голоцене, литодинамическими, гидрологическими и климатическими условиями. Позднечетвертичная история развития шельфа характеризуется чередованием эпох оледенений и межстадиалов, обуславливающих колебания уровня Мирового океана, нередко даже катастрофических [1–3]. Очевидно, что события планетарного масштаба, такие как регрессии и трансгрессии моря, должны оставить на поверхности шельфа седиментологические, биогеохимические, морфологические и другие «отпечатки».

Между тем уровень знаний о процессах, протекающих в арктической системе «суша–шельф», еще крайне недостаточен. До сих пор существует

дефицит данных о природных процессах в криолитозоне, что определяет дискуссионный характер решения многих региональных проблем. Так, например, большой интерес вызывает современный статус затопленных водами последней трансгрессии реликтовых криогенных образований субаэрального генезиса, в отличие от их достаточно хорошо изученных современных аналогов на приморских низменностях Восточной Сибири [4, 5]. Только в последние годы появляются новые и уникальные результаты, позволяющие восстановить некоторые черты плейстоцен-голоценовой эволюции рельефо- и осадкообразования на шельфе региона [6, 7]. Все это могло бы внести значимый вклад в понимание особого восточно-арктического подтипа полярного литогенеза.

В настоящее время интерес к арктическому шельфу быстро усиливается вследствие его перспективности на углеводородное сырье и другие ми-

неральные ресурсы. Понятно, что в такой обстановке получение любой новой научной информации вносит определенный вклад в познание развития природы Арктики. Другая важная проблема связана с необходимостью палеореконструкций природных обстановок с прогнозными целями.

Очевидно, что сформировалась необходимость детального изучения процессов современного осадкообразования и трансформации вещества в восточно-арктической системе «суша–шельф». Именно поэтому для исследований было выбрано море Лаптевых, практически целиком расположенное в пределах материковой отмели и являющееся одной из ключевых областей взаимодействия между сушей и океаном в полярных широтах. Побережье моря сложено многолетнемерзлыми породами, которые в условиях современных климатических изменений деградируют с высокой скоростью. На этом фоне высвобождаются огромные массы осадочного материала, включая реликтовое органическое вещество [8, 9]. Существенный вклад в бюджет осадочного материала приемного бассейна также вносит сток впадающих в море крупнейших рек Лена, Яна и более низкопорядковых водотоков [10].

Отсюда вытекает постановка цели работы – изучение особенностей современного осадкообразования и трансформации вещества в береговой зоне арктических морей. Объектами исследований являются взвешенный материал и донные осадки, включая содержание органического углерода (C_{org}) и его изотопный состав – как маркеров литодинамики среды современного осадкообразования.

В качестве района исследований выбран микро-масштабный полигон в губе Буор-Хая, характеризующейся интенсивной береговой и донной эрозией и принимающей взвешенный сток рек Лена и Омолой. Статья основана на результатах многолетних наблюдений (1999–2016 гг.) авторов.

Район работ, фактический материал, методы исследований

Район исследований. В качестве опорного полигона для изучения экзогенных процессов была выбрана акватория вокруг острова Муостях. Она расположена вблизи протоки Быковская дельты реки Лена, в юго-западной части губы Буор-Хая на юго-востоке моря Лаптевых (рис. 1). Сегодня остров Муостях является уникальной природной лабораторией, где в естественных условиях можно наблюдать деградацию ледового комплекса (рис. 2). По сравнению с другим останцом реликтового субарального рельефа позднелайстоценового времени – островом Макара на юго-востоке Янского залива, этот объект более доступен для научных наблюдений.

История становления района работ такова. В середине сарматского времени (18–16 тыс. лет назад) позднего плейстоцена произошла регрессия уровня моря. Обширные осушенные пространства достигали современного положения 100 м изобаты,

в криогенной обстановке формировались толщи отложений ледового комплекса. На рубеже позднего плейстоцена – раннего голоцена ~12 тыс. лет назад началось затопление ранее оголенного ледниковой регрессией шельфа. Это природное событие завершилось в атлантический период голоцена 7–5 тыс. лет назад. К этому времени береговая линия достигла современных границ, на шельфе обособились острова и архипелаги [11, 12]. Примерно 3–1,5 тыс. лет назад, в конце суббореального периода голоцена, от Быковского полуострова на юго-востоке дельты р. Лена отделился фрагмент суши – ныне остров Муостях [13, 14]. В работах [15, 16] отмечена возможность его обособления вследствие активизации неотектонических движений вдоль сброса, что привело к погружению, частичному размыву и отчленению острова от Быковского п-ова. Очевидно, что затопление должно сопровождаться деградацией многолетнемерзлых высокольдистых отложений. Стратиграфические данные свидетельствуют о ступенчатом характере трансгрессии вод. В этом случае темпы термоабразии достигали максимума в периоды стабилизации уровня, как, например, 7–5 тыс. лет назад. Тогда они достигали 30 м/год, в то время как 11,5–10,0 тыс. лет назад (поздний дриас) снижались до 2,0–2,5 м [17, 18]. Выпалаживание вырабатываемой при наступлении моря эрозионной террасы обеспечивалось сгонно-нагонными явлениями и огромными массами продуктов термоабразии.

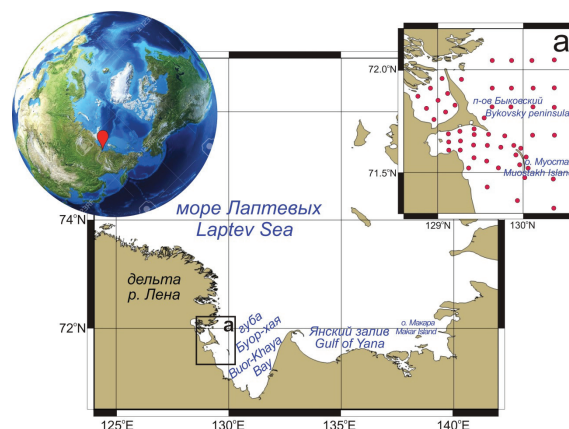


Рис. 1. Района исследований и расположение океанографических станций

Fig. 1. Study area and sampling stations

В настоящее время район исследований представляет собой мелководный участок береговой зоны моря Лаптевых с глубинами не более 15 м. Он расположен на окраине приморской озерно-аллювиальной низменности между отрогами Хараулахского хребта и дельтой р. Лена (рис. 1).

Фактический материал. В основу работы положены результаты ряда многолетних натурных наблюдений и аналитических исследований за период с 1999 по 2016 гг. Количество станций в пределах района наблюдений на подводном береговом склоне – 53, на побережье и пляже – 16.

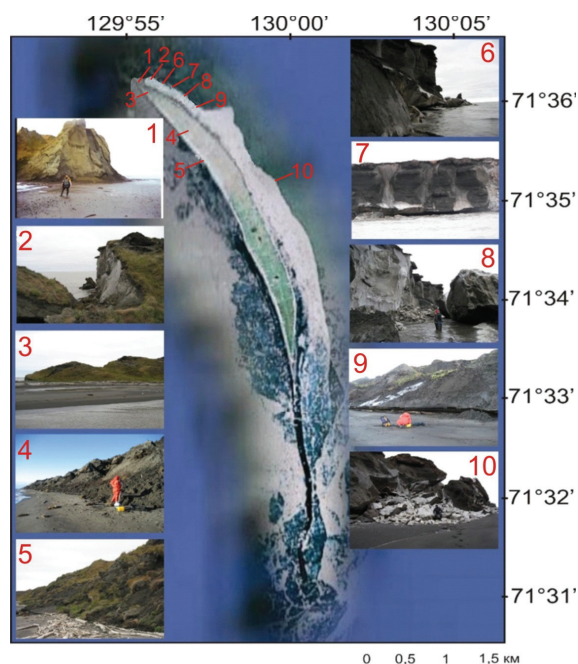


Рис. 2. Современное состояние береговой зоны острова Муостях (фото авторов, А.Н. Чаркина и Д.А. Космача)

Fig. 2. Current state of the coastal zone of the Muostakh island (photos of the authors, A. Charkin and D. Kosmach)

Методы исследований. Получение данных об изменчивости необходимых параметров системы «суша–шельф» базировалось на неоднократном повторе комплекса междисциплинарных наблюдений на фиксированных станциях. С целью получения исходного материала осуществлялись:

- 1) пробоотбор донных осадков, включая поверхностный слой (дночерпатель Van Veen) и керны (малая гравитационная труба, корер «GEMAX», установка разведочного бурения «УРБ-4Т»);
- 2) отбор воды с поверхностного и придонного горизонтов (1,8–5 л, батометры системы Niskin), выделение взвешенного материала (фильтровальная система Millipore). Для выявления общего содержания взвеси вода фильтровалась через мембраны с диаметром калиброванных проб 0,45 мкм [19];

- 3) регистрация термохалинной структуры водной толщи (зонды «SBE19 plus» или «SBE19 plus V2») [20].

В пробах донных осадков и взвеси анализировались:

- размерный состав частиц (лазерный дифракционный микроанализатор «Analysette 22 Fritsch»), при необходимости метод совмещался с традиционным классическим водно-механическим анализом [21]. Литологическая типизация осадков и взвеси проводилась на основе трехкомпонентной классификации ТОИ ДВО РАН по соотношению содержания фракций песка Ps (1–0,1 мм), алеврита А (0,1–0,01 мм) и пелита Pl (<0,01 мм) [22]. Основные принципы использованной типизации сопоставимы с классификациями ИО АН СССР и ВНИИОкеан-геология [21, 23];
- содержание Сорг (пиролизатор «Rock-Eval 6 Turbo», производитель VINCI Technologies). Анализы выполнялись в международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей ТПУ, а также в лабораториях Международного Арктического центра при университете штата Аляска, Фэр-банкс;
- изотопный состав органического углерода $\delta^{13}\text{C}$ (изотопный масс-спектрометр «Delta V advantage» фирмы «Thermo Fisher Scientific»). Исследования проводились в лаборатории геохимии и пластовых нефтей ТомскНИПИнефть.

Результаты и их обсуждение

При анализе потоков вещества в области высоких градиентов термохалинных и седиментологических характеристик водной толщи необходимо учитывать специфику морфологии дна. Как правило, это выложенная эрозионно-аккумулятивная терраса (в пределах подводного берегового склона), выработанная во время голоценовой трансгрессии в отложениях ледового комплекса [24–26]. Уклоны поверхности дна ~0,0001. Подножье террасы на глубинах 6–7 м опоясывает серия вдольбереговых валов, фиксирующих положение древней береговой линии во время остановки уровня голоценовой

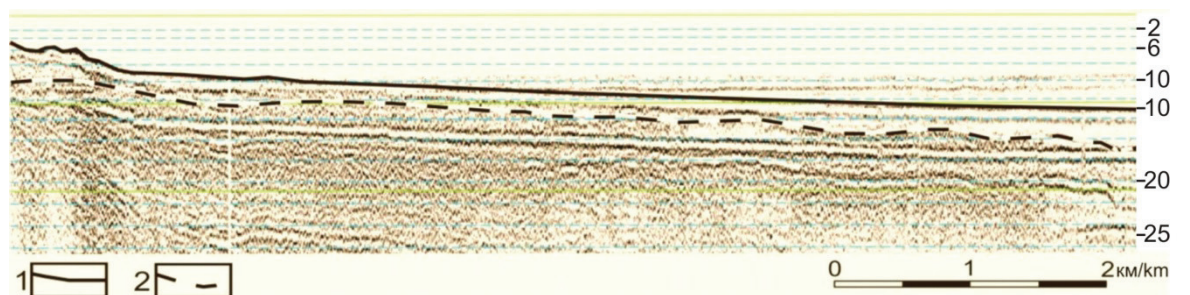


Рис. 3. Сейсмоакустический разрез через подводный береговой склон на участке от подножья окаймляющих вдольбереговых валов (неопубликованные данные В.П. Прокудина, 2007 г.)

Fig. 3. Seismo-acoustic section through the underwater coastal slope starting from the bottom of the bordering longshore bars (V.P. Prokudin, 2007, unpublished)

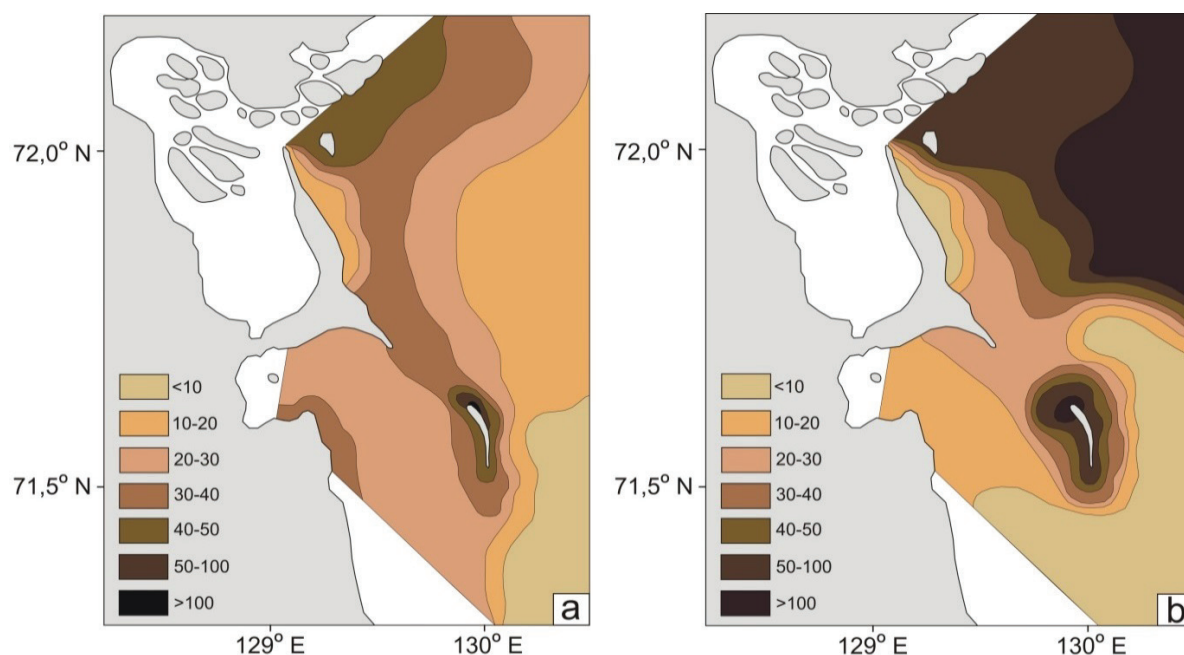


Рис. 4. Структура пространственного распределения взвешенного материала (мг/л) в водах поверхностного (а) и придонного (б) горизонтов. Сентябрь 2006 г. Безледный период

Fig. 4. Spatial distribution of suspended matter (mg/l) in surficial (a) and near bottom (b) waters. September 2006. Ice free season

трансгрессии (рис. 3). Ширина террасы к востоку от о. Муостах составляет 1,4–3 км, а к востоку от п-ова Быковский увеличивается до 13–15 км.

Взвешенный материал. На рис. 4, а, б показана структура пространственного распределения взвешенного материала в безледный период. В поверхностных водах района работ выявлены два устойчивых максимума содержания взвеси, маркирующих источники сноса вещества. Это акватории авандельты вдоль юго-восточных проток дельты р. Лена со значениями 6,5–122 мг/л и вокруг о. Муостах с вариациями содержания в несколько раз выше (27,7–594 мг/л). Обнаруженные зоны высокой мутности сохраняются и у дна, что предопределено однородностью вертикальной термохалинной структуры водной толщи над прибрежно-морской мелководной эрозионно-аккумулятивной террасой (табл. 1).

Чем же обусловлено возникновение максимумов содержания взвеси в придонных водах над мелководной террасой? Как известно, окаймляющие внешний вал осушки (рис. 3) служат своеобразным природным «демпфером», деформирующим волнение и приводящим к окончательной потере его энергии. Согласно принятому морскими геоморфологами расчетному алгоритму [27], обрушение волн происходит при глубине, равной полутора высотам волн, т. е. на уровне около 2 м, к которой и приурочен гребень окаймляющего вала при среднем уровне моря. Теория прибрежной гидродинамики предполагает, что при нагонных ветрах волнение обычно подходит под углом к побережью, а над подводным береговым склоном формируются сильные продольные градиентные потоки [28, 29]. Из прямо пропорциональной зависимости между скоростью нагонного течения и ветра

Таблица 1. Сезонная (внутригодовая) изменчивость термохалинной структуры (Т, S) и содержания взвеси (ВМ) в водах района исследований

Table 1. Seasonal (intra-annual) variability of thermohaline structure (T, S) and the content of suspended matter (SM) in the waters of the study area

Параметры Parameters	Безледный период/Ice free season				Ледовый период/Ice season			
	авандельта delta front	ПБС* US**	авандельта delta front	ПБС US	авандельта delta front	ПБС US	авандельта delta front	ПБС US
	поверхность/surface		дно/bottom		поверхность/surface		дно/bottom	
T, °C	4,5...8,9 x=6,8	6,8...7,6 x=7,0	3,4...8,6 x=6,1	6,6...7,2 x=6,8	0...-0,3 x=-0,1	-0,2...-0,3 x=-0,3	0...-0,4 x=-0,3	-0,2...0,4 x=-0,3
S, ‰	0,1...8,2 x=4,3	2,0...5,0 x=2,4	0,1...18,0 x=10,3	2,0...10,0 x=4,0	0,2...7,8 x=4,2	3,7...4,8 x=4,1	0,9...25,5 x=13,9	4,8...6,4 x=5,4
ВМ, мг/л SM, mg/l	6,5...36,1 x=29,8	47,6...427 x=69,5	7,8...122 x=30,9	27,5...594 x=98,7	0,2...8,3 x=4,1	2,6...7,7 x=5,2	2,6...11,9 x=6,7	9,6...15,7 x=13,8

ПБС* – подводный береговой склон и терраса вокруг о. Муостах; US** – underwater slope

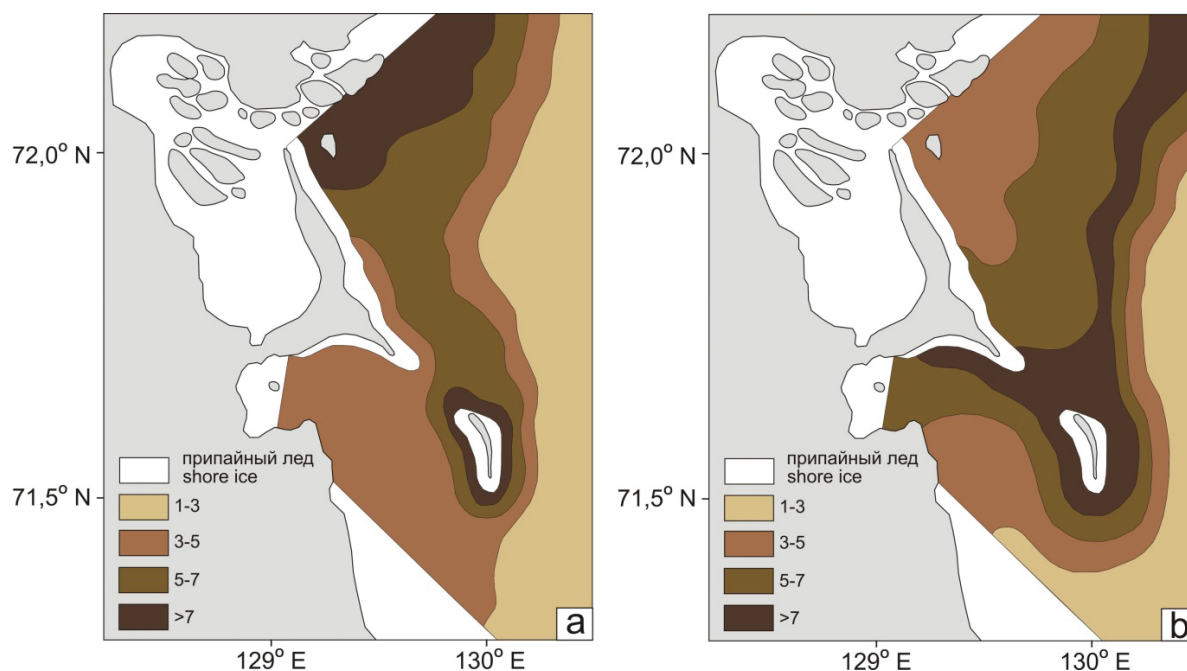


Рис. 5. Структура пространственного распределения взвешенного материала (мг/л) в водах поверхностного (а) и придонного (б) горизонтов. Апрель 2007 г., Ледовый период

Fig. 5. Spatial distribution of suspended matter (mg/l) in surficial (a) and near bottom (b) waters. April 2007. Ice season

[30] следует, что при скорости ветра в сторону берега ~20 м/с возможно развитие градиентного течения до 200 см/с. Такие струйные потоки достигают наибольшей эрозионной энергии в проливах, как, например, в проливе Дмитрия Лаптева между морем Лаптевых и Восточно-Сибирским. Очевидно, что основной фактор насыщения вод взвесью – ремобилизация осадочного материала со дна.

Рост содержания взвеси у дна к свалу глубин – свидетельство гравитационного транспорта частиц в составе нефелоидных потоков. В результате вдоль подножья эрозионно-аккумулятивной террасы (включая и аванделту) формируется нефелоид с содержанием взвеси до 104–122 мг/л (рис. 4, б).

Пространственная структура распределения взвеси подо льдом в целом сохраняется, но содержание взвеси уменьшается в сравнении с арктическим летом на один–два порядка. Средние значения в поверхностных водах над аванделтой составляют 4,1 мг/л, у дна – 6,7 мг/л. Несколько большие величины отмечены над эрозионно-аккумулятивной террасой о. Муостах, 5,2 и 13,8 мг/л соответственно. Вдоль свала глубин и подножья террасы существует область с содержанием взвеси ниже 3 мг/л (рис. 5; табл. 1). Как видно, зимний нефелоид здесь практически отсутствует.

Таким образом, подводная эрозионно-аккумулятивная терраса является областью накопления продуктов размыва ледового комплекса острова Муостах и стабильным источником терригенного материала для массообмена с прилегающими водами шельфа исключительно в безледный период. Независимо от сезона года пространственная

структура распределения взвеси имеет устойчивый циркумтерральный характер.

Донные осадки. Согласно ранее выполненным наблюдениям [31–34] и представленным в предыдущем разделе данным, характер распределения взвешенного материала имеет циркумтерральную структуру, т. е. параллельную береговой черте (рис. 4, 5). Такие же особенности прослеживаются и в распределении донных осадков района работ (рис. 6).

Песчаные осадки маркируют области транзита вещества из береговых источников, как это видно на примере устьевых бара напротив Быковской протоки. Эрозионно-аккумулятивное тело аванделты изрезано многочисленными поперечными эрозионными стоковыми каналами: на их склонах также залегают песчаные осадки, а в ложбинах – песчано-алевритовые. Гравитационные нефелоидные потоки по уклонам дна – один из важных источников поставки тонкозернистого материала к склону и его подножью, где в эрозионно-аккумулятивной литодинамической обстановке идет образование илов.

Характер распределения взвеси и донных осадков указывает, что все мелководье района наблюдений до глубин 7–12 м в настоящее время представляет собой область преимущественного транзита вещества с доминированием эрозионных процессов. Глубже воздействие гидродинамических процессов ослабевает, что является причиной седиментации частиц, как из водной толщи, так и из придонных нефелоидных потоков. В целом мы наблюдаем типичное для придельтовых участков последовательное выведение из водной миграции частиц в соответствии с их гидравлической крупностью.

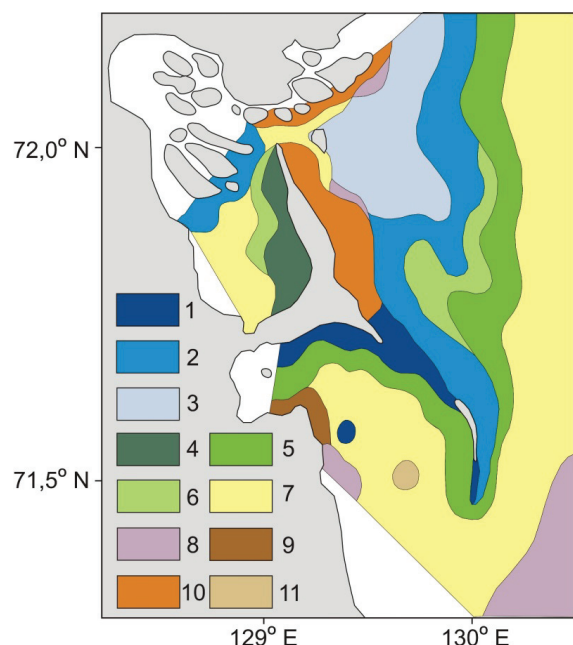


Рис. 6. Структура пространственного распределения донных осадков (литологические типы: 1 – гравийно-галечные разности с песчаным заполнителем; 2 – песок разноразмерный; 3 – песок мелкозернистый; 4 – алеврит песчаный; 5 – алеврит крупнозернистый; 6 – алеврит мелкозернистый; 7 – алеврит пелитовый; 8 – пелит; 9 – миктит песчаный; 10 – миктит алевритовый; 11 – миктит пелитовый)

Fig. 6. Spatial distribution of bottom sediments (lithological types: 1 are the gravel-boulder varieties with sandy aggregate; 2 is the inequigranular sand; 3 is the fine-grained sand; 4 is the sandy silt; 5 is the coarse silt; 6 is the fine-grained silt; 7 is the clayey silt; 8 is the clay; 9 is the sandy mictite; 10 is the silty mictite; 11 is the clayey mictite)

Распределение C_{org} . Не останавливаясь в рамках данной статьи на особенностях пространственной изменчивости органического углерода взвешенной фазы органического вещества, рассмотрим распределение C_{org} в донных осадках.

Таблица 2. Сезонная (внутригодовая) изменчивость элементно-изотопного состава донных осадков района исследований

Table 2. Seasonal (intra-annual) variability of elemental isotope composition of bottom sediments of the research area

Биогеохимические параметры Biogeochemical parameters	Безледный период Ice free season	Ледовый период Ice season
C_{org}/OC , %	0,4...5,4, $\bar{x}=1,5$	0,6...9,3, $\bar{x}=2,4$
$\delta^{13}C$, ‰	-26,7...-22,8, $\bar{x}=-24,8$	-27,9...-22,7, $\bar{x}=-25,3$

Структура пространственной изменчивости содержания данного биогенного элемента в безледный период согласована с распределением литологических типов, что закономерно (рис. 7, а). Так, в направлении от побережья к свалу глубин замещение песчано-алевритовых осадков илами фаций свала глубин, подножья аванделты и термоабразионно-аккумулятивной террасы сопровождается увеличением содержания C_{org} от 0,4 до 5,4 % (табл. 2).

Зимой диапазон содержания C_{org} расширяется до 0,6–9,3 % (рис. 7, б; табл. 2). Область максимального содержания перемещается от подножья и свалу глубин в сторону мелководья. Существенно уменьшается область распространения осадков с содержанием более 4 %. Однако среднее содержание

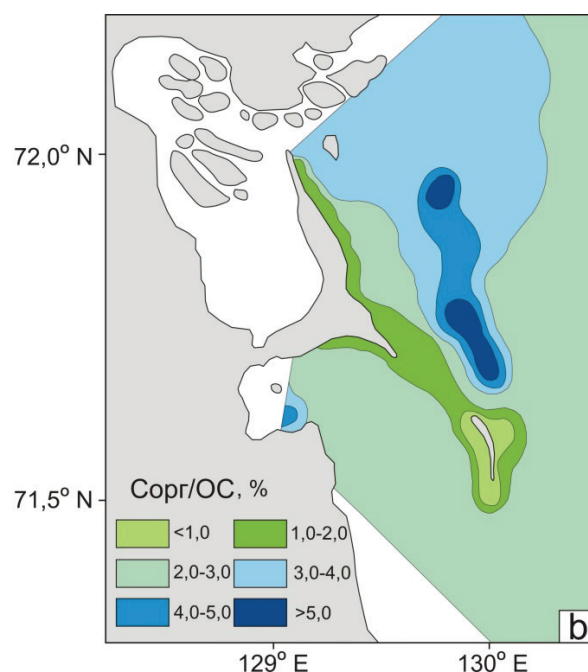
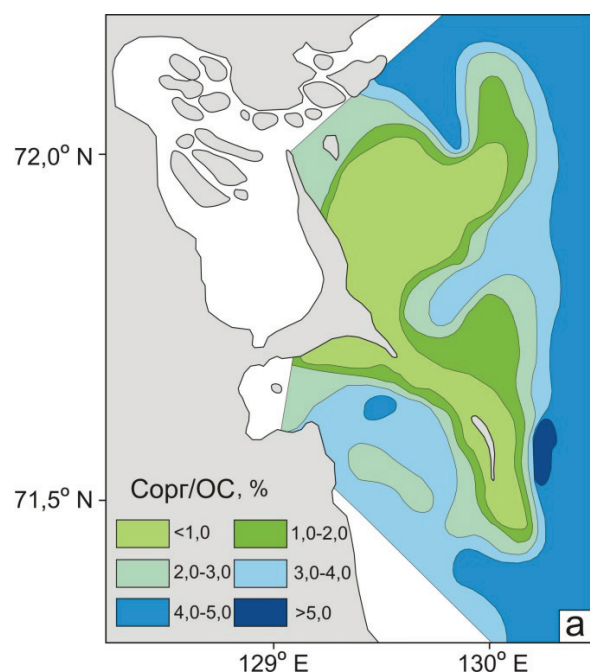


Рис. 7. Структура пространственной изменчивости содержания C_{org} в донных осадках в сентябре 2006 г. (а) и апреле 2007 г. (б)

Fig. 7. Spatial variability of OC content in bottom sediments in September 2006 (a) and April 2007 (b)

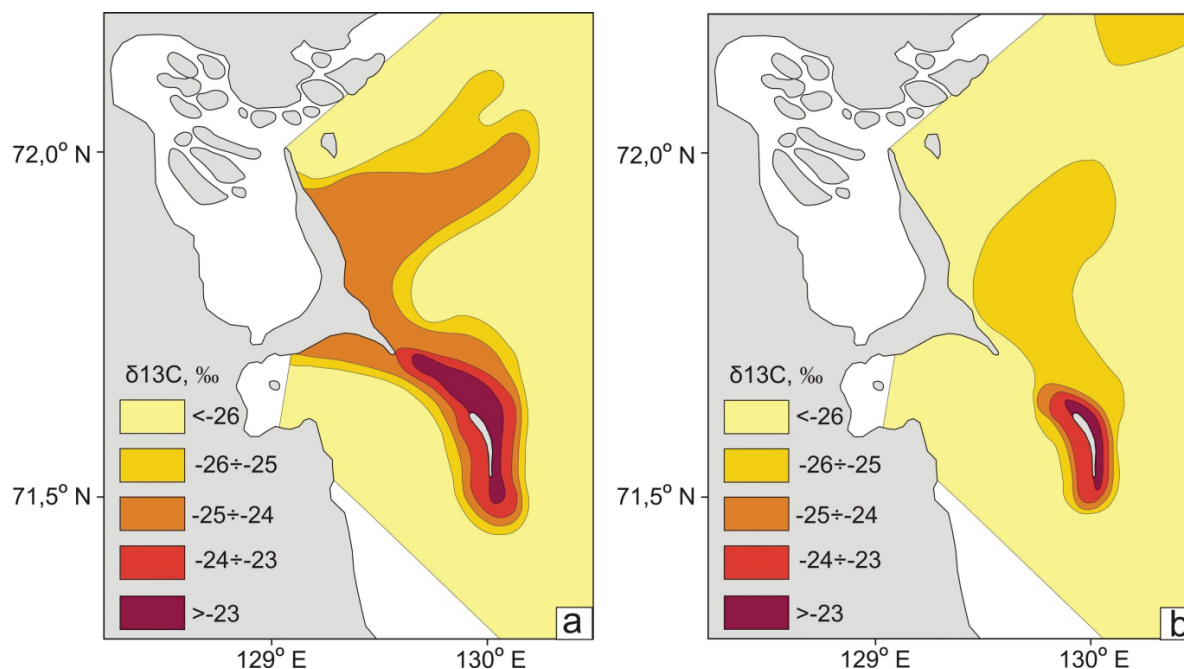


Рис. 8. Структура пространственной изменчивости изотопного состава C_{org} донных осадков в сентябре 2006 г. (a) и апреле 2007 г. (b)

Fig. 8. Spatial variability of organic carbon isotopic composition: September 2006 (a), April 2007 (b)

жание C_{org} подо льдом возрастает в среднем в 1,6 раза. Вероятно, в такой обстановке тонкодисперсный материал транспортируется из дельтовых проток на устьевое взморье в незначительном объеме. Поставка продуктов термоабразии блокирована промерзанием их источников, а биогеохимическая трансформация органического вещества лимитирована низкими температурами и дефицитом кислорода подо льдом.

Изотопный состав C_{org} . Выраженной сезонной изменчивости изотопного состава C_{org} не прослеживается, что видно из структуры его пространственного распределения и диапазонов изотопных величин (табл. 2; рис. 8). Изотопно наиболее тяжелый углерод характерен как для зимнего периода, так и для арктического лета ($\delta^{13}C = -22,8...-22,7$ ‰). В то же время наблюдается некоторое облегчение изотопного состава подо льдом (до $-27,9$ ‰ по сравнению с летним значением $26,7$ ‰).

Данное обстоятельство, согласно работам [35–37], предполагает наличие различных источников органического вещества и возможность его смешения в процессе водной миграции и биогеохимической трансформации на стадии раннего диагенеза. Так, изотопно наиболее легкий углерод обычно характерен для терригенных источников, а изотопно более тяжелый – для автохтонного планктона. Между тем в условиях сильного распреснения материковыми водами развитие морского планктонного источника лимитировано. При этом возникает вопрос о генезисе донных осадков с величинами $\delta^{13}C > -24...-23$ ‰. Выясняя причину данного обстоятельства, отметим следующее:

- осадки с такими изотопными значениями распространены исключительно вблизи термоабразионного побережья;
- наиболее тяжелый изотопный состав углерода отмечен в средне-мелкозернистых песках.

Все это дает право предположить связь изотопно тяжелого углерода с песками береговой зоны. Установлено, что такой изотопный сигнал дает углистое органическое вещество пляжевых сланцевых песков, широко распространенных на побережье района работ. Изотопный состав C_{org} мономинальной фракции указанных осадков оценивается в $-19,6$ ‰ [38]. Отсюда вытекает вывод о формировании изотопного состава песчаных осадков верхней части подводного берегового склона эрозионно-аккумулятивной террасы за счет смешения различных источников терригенного материала, приводящего к его элементарному разбавлению и облегчению изотопного состава.

Процессы смешения интенсивно протекают в зоне волновой активности в период арктического лета и лимитируются зимой. Можно предположить, что выявленные изотопные различия между сезонами года контролируются условиями поставки, водной миграции и смешения вещества в бассейне седиментации. Биогеохимическое фракционирование в бассейне седиментации, вероятно, играет второстепенную роль, однако может преобладать в субаэральной обстановке в период экспозиции продуктов термоабразии на пляже. Благоприятный период для активизации микробиальных и других биогеохимических процессов, участвующих в изотопном фракционировании в арктических условиях (длитель-

ность периода с устойчивой температурой воздуха $>10^{\circ}$, высоким влагонасыщением и повышенными концентрациями оснований и др.) может продолжаться до 50 суток, что было экспериментально показано в работах [39, 40].

Выводы

Циркумтерральная пространственная структура распределения взвеси и донных осадков указывает, что все мелководье района наблюдений до глубин 7–12 м в настоящее время представляет собой область преимущественного транзита вещества с доминированием эрозионных процессов. Глубже воздействие гидродинамических процессов ослабевает, что является причиной седиментации частиц, как из водной толщи, так и из придонных нефелоидных потоков.

Выявлено последовательное выведение из водной миграции частиц в соответствии с их гидравлической крупностью, типичное для придельтовых участков. Подводная эрозионно-аккумулятивная терраса в настоящее время является зоной распространения песчаного и песчано-алевритового материала, источниками которого являются продукты разрушения берегового ледового комплекса и взвешенный сток рек.

Подводная эрозионно-аккумулятивная терраса – поставщик тонкозернистого терригенного материала для массообмена с прилегающими шельфовыми водами исключительно в безледный период.

Результаты многолетних исследований показали относительную устойчивость межгодовой структуры распределения взвеси с четко выраженными различиями условий седиментации между безледным и ледовым периодами полярного литогенеза.

Литологическая структура донных осадков хорошо согласуется с колебаниями содержания $C_{орг}$ и его изотопным составом. Формирование последнего контролируется условиями поставки, водной миграции и смешения вещества из различных источников в бассейне седиментации.

Работа выполнена в Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей, созданной в рамках выполнения мегагранта Правительства Российской Федерации (проект № 14.Z.50.31.0012, рук. И.П. Семилетов) в Национальном исследовательском Томском политехническом университете и в лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Каплин П.А. Новейшая история побережий Мирового океана. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. – 265 с.
- Feng X. et al. Multi-molecular tracers of terrestrial carbon transfer across the pan-Arctic. P. 1: Comparison of hydrolysable components with plant wax lipids and lignin phenols // *Biogeosciences Discuss.* – 2015. – V. 12. – P. 4721–4767.
- Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л. Обстановки морфолитогеоза в прибрежной зоне Мирового океана / под ред. Л.И. Лобковского. – М.: Наука, 2007. – 455 с.
- Разумов С.О. Реликты субаэрального криогенеза микрорельефа на шельфе Восточно-Сибирского моря // *Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч. I. Морфология криолитозоны.* – Якутск: Изд-во СО РАН, 1996. – С. 118–129.
- Хименков А.Н., Брушков А.В. Введение в структурную криологию. – М.: Наука, 2006. – 279 с.
- Dudarev O.V. et al. New data on the subaerial low-center-polygonal relief and factors controlling its transformation and current state on the East Siberian Shelf // *Doklady Earth Sciences.* – 2014. – V. 457 (1). – P. 873–876.
- Dudarev O.V. et al. Peculiarities of the present-day morpholithogenesis on the Laptev Sea Shelf: Semenovskaya shoal (Vasema Land) // *Doklady Earth Sciences.* – 2015. – V. 462 (1). – P. 510–516.
- Karlsson E.S. et al. Contrasting regimes for organic matter degradation in the East Siberian Sea and the Laptev Sea assessed through microbial incubations and molecular markers // *Marine Chemistry.* – 2015. – V. 170. – P. 11–22.
- Semiletov I.P. et al. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nature Geoscience.* – 2016. – V. 9 (5). – P. 361–365.
- Gordeev V.V., Rachold V. River input // *Organic carbon cycle in the Arctic Ocean: present and past.* – Berlin, Germany: Springer Verlag, 2004. – P. 39–46.
- Григоров И.П. Исчезающие острова // *Природа.* – 1946. – № 10. – С. 65–68.
- Драчев С.С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // *Геотектоника.* – 2000. – Т. 6. – С. 43–58.
- Григорьев Н.Ф. Многолетнемерзлые породы приморской зоны Якутии. – М.: Наука, 1966. – 180 с.
- Куницкий В.В. Криолитология низовья Лены. – Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1989. – 162.
- Гусев А.И. Мамонтовский горизонт / *Материалы по четвертичной геологии и геоморфологии СССР. Новая серия.* – М.: Госгеолтехиздат, 1956. – Вып. 1. – С. 169–177.
- Николаев Н.И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 396 с.
- Арэ Ф.Э. Термоабразия морских берегов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 171 с.
- Bauch H.A. et al. A multiproxy reconstruction of the evolution of deep and surface waters in the subarctic Nordic seas over the last 30,000 yr // *Quaternary Science Reviews.* – 2001. – V. 20 (4). – P. 659–678.
- Charkin A.N. et al. Seasonal and interannual variability of sedimentation and organic matter distribution in the Buor-Khaya Gulf: the primary recipient of input from Lena River and coastal erosion in the southeast Laptev Sea // *Biogeosciences.* – 2011. – V. 8 (9). – P. 2581–2594.
- Semiletov I.P. et al. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion // *Biogeosciences.* – 2011. – V. 8. – P. 2407–2426.
- Петелин В.П. Новый метод водного механического анализа морских осадков // *Океанология.* – 1961. – Т. 1. – № 1. – С. 143–148.
- Лихт Ф.Р. и др. Структура осадков и фации Японского моря. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. – 283 с.
- Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки арктических морей России / под ред. И.С. Грамберг. – СПб.: ВНИИ Океангеология, 1999. – 286 с.
- Валлетер А.В. Характерные формы рельефа прибрежного шельфа Восточно-Сибирского моря и их значение для палео-

- географических реконструкций // Геоморфология и палеогеография шельфа. – М.: Наука, 1978. – С. 134–139.
25. Григорьев М.Н. Криоморфогенез устьевой области р. Лены. – Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1993. – 176 с.
26. Фартышев А.И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. – Новосибирск: Наука, 1993. – 136 с.
27. Леонтьев О.К. Геоморфология морских берегов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. – 336 с.
28. Боуден К.Ф. Физическая океанография прибрежных вод. – М.: Мир, 1988. – 324 с.
29. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. – М.: ГЕОС, 2001. – 272 с.
30. Шулейкин В.В. Связь между климатом Европы и переносом тепла в Атлантике // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1968. – Т. 4. – № 3. – С. 243–261.
31. Salvadó J.A. et al. Organic carbon remobilized from thawing permafrost is resequenced by reactive iron on the Eurasian Arctic Shelf // Geophysical Research Letters. – 2015. – V. 42 (19). – P. 8122–8130.
32. Dudarev O.V. et al. The current state of submarine island relicts on the East Siberian shelf // Doklady Earth Sciences. – 2008. – V. 419 (1). – P. 352–358.
33. Charkin A.N. et al. Peculiarities of the formation of suspended particulate matter fields in the Eastern Arctic seas // Doklady Earth Sciences. – 2015. – V. 462 (2). – P. 626–630.
34. Semiletov I.P. et al. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System // Environmental Research Letters. – 2012. – 7 (1). – 015201.
35. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. – М.: Недра, 1968. – 224 с.
36. Karlsson E.S. et al. Different sources and degradation status of dissolved, particulate and sedimentary organic matter along the Eurasian Arctic coastal margin // Global Biogeochemical Cycle. – 2016. – V. 30 (6). – P. 898–919.
37. Walsh J.J. et al. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean // Prog. Oceanog. – 1989. – V. 22. – P. 277–359.
38. Дударев О.В. и др. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России: монография. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 192 с.
39. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Сухнова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. – М.: Наука, 1996. – 258 с.
40. Bröder L. et al. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea // Organic Geochemistry. – 2016. – V. 91. – P. 16–30.

Поступила 26.06.2017 г.

Информация об авторах

Рубан А.С., аспирант, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Дударев О.В., доктор геолого-минералогических наук, научный сотрудник международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Национального исследовательского Томского политехнического университета; ведущий научный сотрудник лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН.

Мазуров А.К., доктор геолого-минералогических наук, первый проректор, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Панова Е.В., аспирант, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.14

SETTINGS OF CURRENT SEDIMENTATION ON THE UNDERWATER SLOPE OF BUOR-KHAYA BAY (LAPTEV SEA)

Alexey S. Ruban¹,
ruban@tpu.ru

Oleg V. Dudarev^{1,2},
dudarev@poi.dvo.ru

Alexey K. Mazurov¹,
akm@tpu.ru

Elena V. Panova¹,
elenapanova@tpu.ru

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

² Pacific Oceanological Institute named after V.I. Ilyichev, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia.

Nowadays, the Arctic shelf is of increasing interest due to its large reserves of hydrocarbons and other mineral resources. Meanwhile, current knowledge about the processes occurring in the Arctic is still extremely inadequate. There is still not enough data on natural processes within permafrost, which raises many problems and discussions around regional issues. Therefore, new scientific information can further promote the study of the Arctic nature.

This study was aimed to identify the specific features of sedimentation and organic matter transformation in the coastal zone of the Arctic seas based on long-term observations.

The objects of the study are suspended matter and bottom sediments, including organic carbon content (C_{org}) and its isotope composition as markers of lithodynamics of the modern depositional environment. Bottom sediments samples were investigated for grain-size composition, organic carbon content and isotopic composition. Furthermore, spatio-temporal variability of the suspended matter distribution in the water column was estimated.

Conclusions: for the ice-free period, there are two typical stable turbidity maxima with a suspended matter content ranging from 6,5 to 594 mg/l. Towards the continental slope, the replacement of sandy-aleuritic sediments with clays of continental slope, avandelt bottom, and thermoabrasive-accumulative terrace is accompanied by an increase in organic carbon values from 0,4 to 5,4 % with winter values ranging from 0,6 to 9,3 %. Isotopic composition of organic carbon in the bottom sediments varied from $-27,9$ to $-22,7$.

Key words:

East Siberian shelf, Laptev Sea, permafrost, thermal abrasion, bottom sediments, suspended matter, sedimentation, organic carbon, carbon isotope composition.

The study was carried out at the International Scientific and Educational Laboratory of the Arctic Seas Carbon Study, created with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (under the contract № 14.Z50.31.0012, headed by I.P. Semiletov) at the National Research Tomsk Polytechnic University and at the Arctic Studies Laboratory of the V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

- Kaplin P.A. *Noveyshaya istoriya poberezhnykh Mirovogo okeana* [The newest history of the World Ocean coasts]. Moscow, Moscow state university Publ., 1973. 265 p.
- Feng X. Multi-molecular tracers of terrestrial carbon transfer across the pan-Arctic. P. 1: Comparison of hydrolysable components with plant wax lipids and lignin phenols. *Biogeosciences Discuss*, 2015, vol. 12, pp. 4721–4767.
- Pavlidis Yu.A., Nikiforov S.L. *Obstanovki morfolitogeneza v pribrezhnoy zone Mirovogo okeana* [The conditions of morpholithogenesis in the coastal zone of the world ocean]. Ed. by L.I. Lobkovskiy. Moscow, Nauka Publ., 2007. 455 p.
- Razumov S.O. Relikty subaeralnogo kriogeneza mikroreliefa na shelfe Vostochno-Sibirskogo morya [Relics of microrelief subaerial cryogenesis on the East Siberian Sea shelf]. *Kriolitizona i podzemnye vody Sibiri. Ch. 1. Morfologiya kriolitozony* [Cryolithic zone and underground waters. P. 1. Cryolithic zone morphology]. Yakutsk, SO RAN Publ., 1996. pp. 118–129.
- Khimenkov A.N., Brushkov A.V. *Vvedenie v strukturnuyu kriologiyu* [Introduction to the structural geology]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 279 p.
- Dudarev O.V. New data on the subaerial low-center-polygonal relief and factors controlling its transformation and current state on the East Siberian Shelf. *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 457 (1), pp. 873–876.
- Dudarev O.V. Peculiarities of the present-day morpholithogenesis on the Laptev Sea Shelf: Semenovskaya shoal (Vasema Land). *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 462 (1), pp. 510–516.
- Karlsson E.S. Contrasting regimes for organic matter degradation in the East Siberian Sea and the Laptev Sea assessed through microbial incubations and molecular markers. *Marine Chemistry*, 2015, vol. 170, pp. 11–22.
- Semiletov I.P. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon. *Nature Geoscience*, 2016, vol. 9 (5), pp. 361–365.
- Gordeev V.V., Rachold V. River input. *Organic carbon cycle in the Arctic Ocean: present and past*. Berlin, Germany, Springer Verlag, 2004. pp. 39–46.

11. Grigorov I.P. Ischezayushchie ostrova [Endangered islands]. *Priroda*, 1946, vol. 10, pp. 65–68.
12. Drachev S.S. Tektonika riftovoy sistemy dna morya Laptevyykh [Tectonics of the rift system of the Laptev Sea bottom]. *Geotektonika*, 2000, vol. 6, pp. 43–58.
13. Grigoriev N.F. *Mnogoletnemerzlye porody primorskoj zony Yakutii* [Permafrost rocks of the Yakutia coastal zone]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 180 p.
14. Kunitskiy V.V. *Kriolitologiya nizovya Leny* [Cryolithology of the Lena lower reaches]. Yakutsk, IMZ CO AN SSSR Publ., 1989. 162 p.
15. Gusev A.I. Mamontovy gorizont [Mammoth horizon]. *Materialy po chetvertichnoy geologii i geomorfologii SSSR. Novaya seriya* [Materials on quaternary geology and geomorphology of the USSR. New series]. Moscow, Gosgeoltechizdat Publ., 1956. Vol. 1, pp. 169–177.
16. Nikolaev N.I. *Neotektonika i ee vyrazhenie v structure i relefe territorii SSSR* [Neotectonics and its expression in the structure and relief of the USSR territory]. Moscow, Gosgeoltechizdat Publ., 1962. 396 p.
17. Are F.E. *Termoabraziiy morskikh beregov* [Thermoabrasion of sea shores]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 171 p.
18. Bauch H.A. A multiproxy reconstruction of the evolution of deep and surface waters in the subarctic Nordic seas over the last 30,000 yr. *Quaternary Science Reviews*, 2001, vol. 20 (4), pp. 659–678.
19. Charkin A.N. Seasonal and interannual variability of sedimentation and organic matter distribution in the Buor-Khaya Gulf: the primary recipient of input from Lena River and coastal erosion in the southeast Laptev Sea. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8 (9), pp. 2581–2594.
20. Semiletov I.P. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 2407–2426.
21. Petelin V.P. Novy metod vodnogo mekhanicheskogo analiza morskikh osadkov [New method of water mechanical analysis of marine sediments]. *Okeanology*, 1961, vol. 1 (1), pp. 143–148.
22. Likht F.R. *Struktura osadkov i fatsii Yaponskogo morya* [Structure of bottom sediments and facies of Japan Sea]. Vladivostok, DVNC AN SSSR Publ., 1983. 283 p.
23. Kosheleva V.A., Yashin D.S. *Donnye osadki arkticheskikh morey Rossii* [Bottom sediments of the Russian Arctic seas]. Ed. by I.S. Gramberg. St-Petersburg, VNI Okeangeologiya Publ., 1999. 286 p.
24. Valpeter A.V. Kharakternye formy relefa pribrezhnogo shelfa Vostochno-Sibirskogo morya i ikh znachenie dlya paleogeograficheskikh rekonstruktsiy [Distinctive forms of the relief of the East Siberian Sea coastal shelf and their significance for paleogeographic reconstructions]. *Geomorfologiya i paleogeografiya shelfa* [Geomorphology and paleogeography of the shelf]. Moscow, Nauka Publ., 1978. pp. 134–139.
25. Grigoriev M.N. *Kriomorfogenez ustevoy oblasti r. Leny* [Cryomorphogenesis of the estuary region of Lena river]. Yakutsk, IMZ SO RAN Publ., 1993. 176 c.
26. Fartyshev A.I. *Osobennosti pribrezhno-shelfovoy kriolitozony morya Laptevyykh* [Features of the coastal-shelf cryolithozone of Laptev Sea]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993. 136 p.
27. Leontev O.K., Nikiforov L.G., Safyanov G.A. *Geomorfologiya morskikh beregov* [Geomorphology of the sea coasts]. Moscow, Moscow state university Publ., 1975. 336 p.
28. Bouden K.F. *Fizicheskaya okeanografiya pribrezhnykh vod* [Physical Oceanography of Coastal Waters]. Moscow, Mir Publ., 1988. 234 p.
29. Leontev O.K. *Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov* [Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows]. Moscow, GEOS Publ., 2001. 272 p.
30. Shuleykin V.V. Svyaz mezhdu klimatom Evropy i perenosom tepla v Atlantike [The relationship between European climate and heat transfer in the Atlantic]. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery okeana*, 1968, vol. 4 (3), pp. 234–261.
31. Salvadó J.A. Organic carbon remobilized from thawing permafrost is resequenced by reactive iron on the Eurasian Arctic Shelf. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42 (19), pp. 8122–8130.
32. Dudarev O.V. The current state of submarine island relicts on the East Siberian shelf. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 419 (1), pp. 352–358.
33. Charkin A.N. Peculiarities of the formation of suspended particulate matter fields in the Eastern Arctic seas. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 462 (2), pp. 626–630.
34. Semiletov I.P. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System. *Environmental Research Letters*, 2012, vol. 7 (1), 015201.
35. Galimov E.M. *Geokhimiya stabilnykh izotopov ugleroda* [Geochemistry of stable carbon isotopes]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 224 p.
36. Karlsson E.S. Different sources and degradation status of dissolved, particulate and sedimentary organic matter along the Eurasian Arctic coastal margin. *Global Biogeochemical Cycle*, 2016, vol. 30 (6), pp. 898–919.
37. Walsh, J.J. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean. *Prog. Oceanog.*, 1989, vol. 22, pp. 277–359.
38. Dudarev O.V. *Sovremennyy litomorfogenez na vostochno-arkticheskom shelfe Rossii: monografiya* [Modern lithomorphogenesis on Russian East Siberian Arctic shelf. monography]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2016. 192 p.
39. Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhnova N.I. *Organicheskoe veshchestvo pochvy Rossiyskoy Federatsii* [Organic matter of soils of the Russian Federation]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 258 p.
40. Bröder L. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea. *Organic Geochemistry*, 2016, vol. 91, pp. 16–30.

Received: 26 June 2017.

Information about the authors

Alexey S. Ruban, post-graduate student, teaching assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg V. Dudarev, Dr. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University; leading researcher, the Pacific Oceanological Institute named after V.I. Ilyichev, Far East Division, Russian Academy of Sciences.

Alexey K. Mazurov, Dr. Sc., first vice-rector, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena V. Panova, post-graduate student, teaching assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.