УДК550.4:552.14

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОСАДКОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ШЕЛЬФА

Панова Елена Владимировна[1],
elenapanova@tpu.ru

Рубан Алексей Сергеевич[1],
ruban@tpu.ru

Дударев Олег Викторович[2,1],
dudarev@poi.dvo.ru

Тези Томмасо[3],
tommaso.tesi@bo.ismar.cnr.it

Брёдер Лиза[4],
elenapanova@tpu.ru

Густафссон Орьян[5],
Orjan.Gustafsson@aces.su.se

Гринько Андрей Алексеевич[1],
grinko@tpu.ru

Шахова Наталья Евгеньевна[1],
shahova@tpu.ru

Гончаров Иван Васильевич[1],
GoncharovIV@tomsknipi.ru

Мазуров Алексей Карпович[1],
akm@tpu.ru

Семилетов Игорь Петрович[2,1],
igorsm@iarc.uaf.edu

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

[2] Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

[3] Институт Морских Наук Итальянского Национального Исследовательского Совета,
Италия, 40129 Болонья, Виа Гобетти, 101.

[4] Свободный университета Амстердама,
Нидерланды, 1081 HV Амстердам, Де Бёлелаан, 1105.

[5] Кафедра наук об окружающей среде и аналитической химии, Стокгольмский университет,
Швеция, 106 91 Стокгольм, Сванте Аррениусвэг, 8С.

Актуальность. *Восточно-Сибирский арктический шельф – уникальный природный комплекс, в последние десятилетия представляющий особый интерес для ученых при исследовании функционирования арктической климатической системы и ее влияния на усиливающееся глобальное потепление. Кроме того, разностороннее изучение природных процессов на арктическом шельфе мотивировано и другим ключевым прикладным аспектом – интенсификацией поисково-разведочных работ на углеводородные ресурсы.*

Целью *работы явилось изучение литологических особенностей донных осадков на Восточно-Сибирском арктическом шельфе и оценка их влияния на пространственное распределение органического материала на территории Восточно-Сибирского арктического шельфа.*

Материалы и методы. *Исследование основано на изучении проб, отобранных на внешней части Восточно-Сибирского арктического шельфа в 45-дневной мультидисциплинарной экспедиции SWERUS-3 на ледоколе ODEN летом 2014 г. На внутреннем и среднем Восточно-Сибирском арктическом шельфе образцы осадков были отобраны в экспедиции International Siberian Shelf Study (ISSS-08) на борту исследовательского судна «Яков Смирницкий» летом 2008 г. Для образцов были определены их грану-*

лометрические характеристики, удельная площадь поверхности зерен и содержание общего органического углерода. Показано, что на исследуемой акватории преобладает тип устойчивой подледной седиментации с аккумуляцией преимущественно дисперсных осадков. Тем не менее, на внешнем шельфе выделены азональные для данного района песчаные области, обусловленные воздействием одного или нескольких внешних факторов, среди которых современная ледовая эрозия, экзарационная деятельность палео-ледников в раннем голоцене, а также интенсивная разгрузка газовых флюидов, сопровождающаяся вымыванием тонкозернистых осадков. Рассмотрено пространственное распределение органического вещества в донных осадках Восточно-Сибирского арктического шельфа и его взаимосвязь с их литологическими свойствами.

Ключевые слова:
Восточно-Сибирский шельф, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, донные осадки, органический углерод, удельная площадь поверхности зерен.

Введение

Восточно-Сибирский арктический шельф (ВСШ) – уникальный природный комплекс, в последние десятилетия представляющий особый интерес для ученых при исследовании функционирования арктической климатической системы и ее влияния на усиливающееся глобальное потепление. Самый широкий и мелководный шельф в Мировом океане, в котором находится около 90 % подводной мерзлоты Северного Ледовитого океана, хранит огромное количество органического углерода ($C_{орг}$) в различных формах. Для сравнения арктические почвы содержат более половины мирового запаса всего почвенного углерода в наземной мерзлоте ($1000*10^{15}$ г), при этом запасы углерода в древних ледовых комплексах и подводной мерзлоте ВСШ оцениваются приблизительно в $400*10^{15}$ и $1400*10^{15}$ г, соответственно [1–3].

Увеличение темпов деградации прибрежной и подводной мерзлоты на ВСШ приводит к вовлечению в современный биогеохимический цикл огромного количества органического вещества, что может существенно повлиять на происходящие в наше время биогеохимические процессы [4–6]. Одним из важных экологических последствий экспорта эрозионного $C_{орг}$ в системе суша–шельф ВСШ является асидификация вод вследствие окисления эрозионного $C_{орг}$ до двуокиси углерода [7]. Показано, что коррозионные – обогащенные двуокисью углерода – воды ВСШ адвективно переносятся в глубокую часть Северного Ледовитого океана и далее через пролив Фрама в Северную Атлантику [8].

Одним из наиболее важных направлений исследований компонентов цикла $C_{орг}$ в ВСШ является изучение и оценка масштабов массированного выброса метана в водную толщу – атмосферу вследствие деградации подводной мерзлоты и разрушения метановых гидратов [3, 4, 9]. В работах [9, 10] было показано, что подводная мерзлота, в отличие от наземной, уже находится в стадии транзита в немерзлое состояние, что проявляется в существовании сквозных таликов, которые являются газопроводящими путями для разгрузки пузырькового метана из донных осадков. В рамках данной работы показано, что этот процесс может быть одним из факторов, определяющих особенности седиментации в областях массированного пузырькового выброса метана [10].

Понимание природных закономерностей глобального цикла $C_{орг}$ и изучение его особенностей применительно к Арктической экосистеме являются ключевыми этапами в исследовании и объективной оценке происходящих в настоящее время климатических изменений. Кроме того, разностороннее изучение природных процессов на арктическом шельфе мотивировано и другим ключевым прикладным аспектом – интенсификацией поисково-разведочных работ на углеводородные ресурсы.

В данном контексте становится очевидной необходимость изучения процессов современного осадкообразования, и в том числе поиска взаимосвязи литологического состава донных осадков и содержания в них $C_{орг}$ на территории ВСШ.

В работе авторы исследуют донные осадки с целью установления некоторых литологических закономерностей и особенностей связи органического вещества с минеральной матрицей зерен и его сохранения на базе обширного массива данных для уникальной территории, охватывающей значительную часть ВСШ, – море Лаптевых и Восточно-Сибирское море.

Район работ, материалы и методы исследований

Район исследований. ВСШ – самый мелководный шельф в мире, глубина которого на более чем 75 % площади составляет <50 м [11, 12]. Исследуемый регион охватывает большую часть ВСШ, включая внутренний и внешний шельфы моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря (рис. 1).

Самое мелководное среди всех морей Северного Ледовитого океана, море Лаптевых, занимает площадь около 500000 км^2 и характеризуется средней глубиной около 48 м [13]. Шельф моря Лаптевых представляет собой преимущественно аккумулятивно-денудационную равнину. В рельефе дна значимую роль играют реликтовые субаэральные формы рельефа – древние береговые линии и палеодолины [14, 15]. Ледовый покров на протяжении 8–9 месяцев блокирует ветровое волнение и перемешивание вод, что исключает процессы ресуспензии и замедляет процессы переноса вещества в системе суша–шельф и седиментации. В конечном итоге это приводит к формированию выположенного профиля подводного склона. В такой обста-

новке происходит аккумуляция тонкодисперсных глинистых осадков, не характерных для прибрежного мелководья [14].

Восточно-Сибирское море занимает около 1000000 км^2 со средней глубиной в 58 м, являясь самым большим по площади окраинным морем в Северном Ледовитом океане [16]. Восточно-Сибирское море – наиболее ледовитое среди морей Российской Арктики. Длительная продолжительность экранирования ледяным покровом и резкая ослабленность волновых процессов привела к формированию крайне выположенного рельефа на внутреннем шельфе. Такая форма рельефа также нетипична для подобной зоны и является одним из ее отличительных признаков. Другой особенностью являются многочисленные вдольбереговые гряды, осложняющие выровненный рельеф шельфа. Подобная геоморфология также формирует особый гидродинамический режим осадконакопления: продолжительная устойчивая подледная седиментация обеспечивает накопление преимущественно тонкодисперсных осадков вне зависимости от их удаленности от побережья, при этом периодические взмучивания, вызванные волновой деятельностью, приводят к их перераспределению, в том числе азональному [14, 17].

Фактический материал. Данное исследование основано на изучении проб, отобранных на внешнем шельфе ВСШ в 45-дневной мультидисциплинарной экспедиции SWERUS-3 на ледоколе ODEN летом 2014 г. На внутреннем и среднем ВСШ образцы осадков были отобраны в экспедиции International Siberian Shelf Study (ISSS-08) на борту исследовательского судна «Яков Смирницкий» летом 2008 г. Для отбора образцов кернов осадков использовался гравитационный пробоотборник GEMAX (трубка Plexiglas, диаметр 90 мм); поверхностные пробы отбирались с помощью дночерпателя van Veen.

Образцы осадков сразу после отбора были перемещены в пластиковые пакеты и далее хранились в холодильнике при температуре –20 °C. Для настоящего исследования использовались образцы, взятые с поверхности, то есть с интервалов 0–0,5 или 0–1 см.

Методы исследований. Измерение общего $C_{орг}$ в образцах осуществлялось на элементном анализаторе Carlo Erba NC2500.

Определение гранулометрических характеристик произвели с использованием лазерного анализатора Malvern Mastersizer 3000. Принцип его работы основывается на измерении интенсивности светорассеяния во время прохождения лазерного луча сквозь диспергированные частицы образца.

Значения удельной площади поверхности были определены с помощью автоматического анализа-

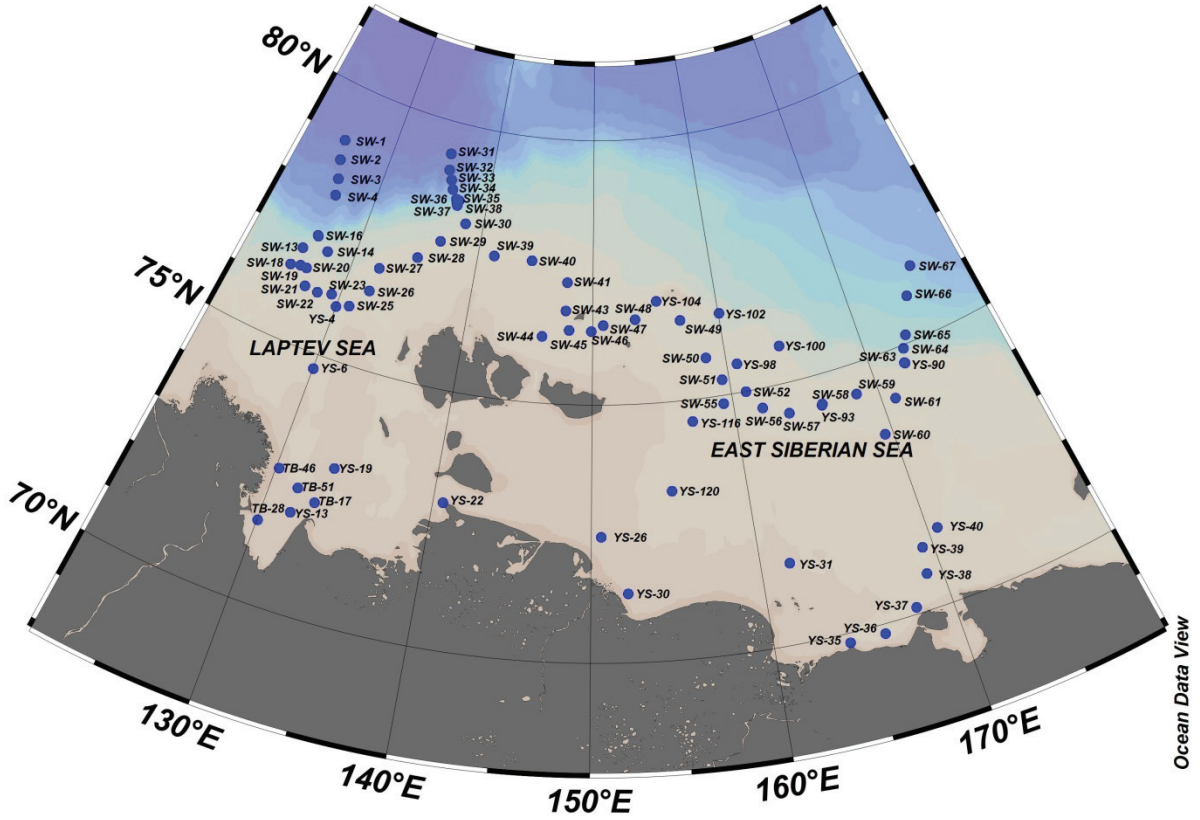

Рис. 1. *Район исследования. Голубыми точками отмечены места отбора проб донных осадков (индекс SW – экспедиция SWERUS-2014; индексы YS и TB – экспедиция ISSS-08)*

Fig. 1. *Map of the study area. Blue dots mark the sediment samples sites (SW Index – SWERUS-2014 expedition; YS and TB indexes – ISSS-08 expedition)*

тора удельной поверхности и пористости Gemini VII с применением стандартного метода БЭТ (Брунауэра–Эммета–Теллера) [18].

Результаты и обсуждение

Исследование охватывает большую часть ВСШ. С учетом особенностей донного рельефа мы условно разделяем образцы на две группы: отобранные с внутреннего шельфа, непосредственно примыкающего к линии побережья, и с внешнего шельфа, ограниченного материковым склоном (~100 м изобата).

Предыдущие исследования литологии донных осадков отмечали повсеместное доминирование дисперсных осадков на шельфе Восточно-Сибирского моря, обусловленное спецификой материала, поставляемого из терригенной области сноса [14, 19, 20]. Море Лаптевых при этом характеризуется более разнообразным гранулометрическим составом донных осадков: в восточной части в определении состава донных осадков значительную роль играет абразия берегового ледового комплекса – четвертичных отложений Приморской низменности и Новосибирских островов, где прибрежные породы разрушаются в процессе термоабразии и волнового воздействия. В западную часть моря Лаптевых речным стоком выносится преимущественно тонкодисперсный осадочный материал, что отличает распределение осадков в данном районе от типичных приустьевых участков. При этом песчано-алевритовый материал поступает преимущественно за счет термо-абразии берегов [9, 21].

Сохранение выдержанности дисперсной структуры донных осадков в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море практически повсеместно свидетельствует об устойчивой «подледной» обстановке осадконакопления (рис. 2, *а*). Зоны наиболее тонкозернистых осадков здесь формируются под влиянием устойчивого гравитационного осаждения дисперсных частиц в стабильных условиях подо льдом, то есть вне зоны действия волновых процессов.

Тем не менее, при общем преобладании илистых осадков на внешнем шельфе отчётливо выделяются азональные песчаные области со средним размером зерен >60 мкм (рис. 2, *а*). Такие области сформировались в центральной части моря Лаптевых и к северу от Новосибирских островов, а также на северо-западе Восточно-Сибирского моря.

Мы предлагаем следующие гипотезы образования таких необычных для внешнего арктического шельфа песчаных полей.

Во-первых, в рассматриваемом интервале глубин были зафиксированы многочисленные потоки газов, выходящие из толщи донных осадков в виде интенсивных пузырьковых фонтанов [10, 22], что может служить фактором, ответственным за «вымывание» тонкой фракции поверхностных осадков. Здесь необходимо отметить, что песчаное поле в центральной части моря Лаптевых пространственно совпадает с районом активной разгрузки газовых флюидов [10], при этом к северу от Новосибирских островов такие выходы газов не были обнаружены.

Во-вторых, геофизические наблюдения неоднократно регистрировали следы ледовой эрозии как в прибрежной, так и во внешней части ВСШ [9, 23–25]. Вопрос о времени появления обнаруженных экзарационных борозд остается дискуссионным. В исследовании [26] авторы приводят доказательства существования покровного ледника мощностью >1 км, охватывающего в период последнего оледенения хребет Ломоносова в центральной части Северного Ледовитого океана и распространяющегося вплоть до окраины современных Новосибирских островов. Более того, в районе архипелага Де Лонга обнаружена впадина, происхождение которой ассоциируется с выпахиванием килем покровного ледника примерно 50–70 тыс. лет назад [27].

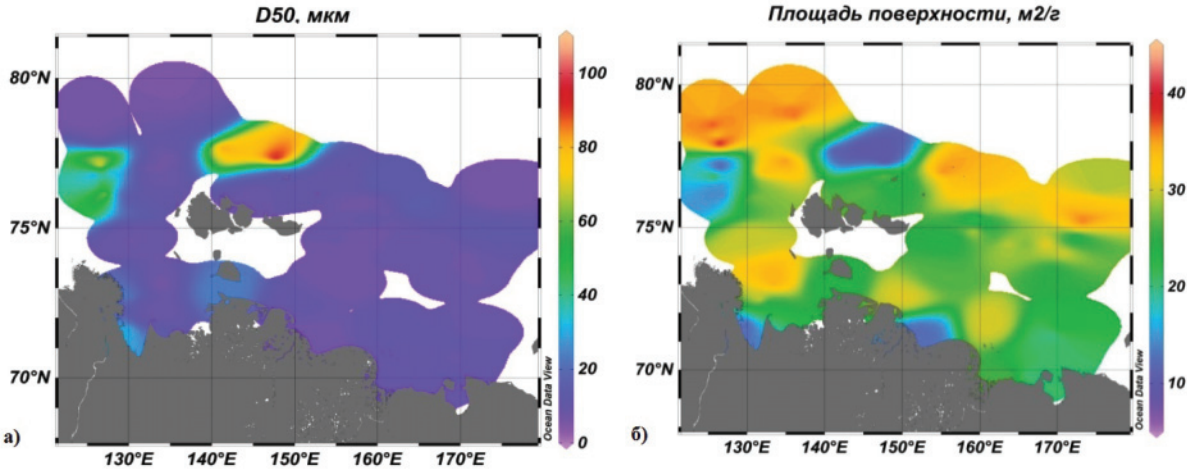

Рис. 2. *Распределение донных осадков по: а) медианному размеру зерен – D50, мкм; б) величине удельной площади поверхности, м²/г*

Fig. 2. *Mean grain size (a) and specific surface area (SSA) (б) distribution in surface sediments*

В то же время существуют свидетельства современного происхождения борозд выпахивания в районе исследований. Так, например, в нашей экспедиции, выполненной на НИС Академик Лаврентьев в сентябре 2016 г. в море Лаптевых, в районе изобат 60–70 м были обнаружены айсберги, способные выпахивать поверхностный донный слой. Из этого следует, что процессы ледовой экзарации в ВСШ и на прилежащем материковом склоне могут происходить как в наше время, так и в прошлом. О масштабах современного ледового выпахивания свидетельствуют размеры борозд, протягивающихся на десятки километров, шириной до нескольких десятков метров и значительной глубиной выпахивания дна (до 10 м), что в свою очередь может приводить к ускорению процессов массированной разгрузки пузырькового метана из донных осадков в водную толщу – атмосферу [9]. Из этого следует, что выделенные нами азональные песчаные области могут быть следствием как современной ледовой эрозии, так и комбинации ледового выпахивания с фактором пузырькового вымывания тонкой фракции осадков. Современный генезис борозд может объяснить «свежую» литологическую структуру поверхностных осадков, еще не перекрытых дисперсным материалом.

Из вышеизложенного следует, что наиболее объективным будет рассматривать совокупное действие одновременно нескольких факторов, приводящих к формированию донных осадков неоднородного гранулометрического состава: в их числе может быть и интенсивный вынос дисперсного материала газовыми потоками на западе, и процессы современной и палеоэкзарации на северном полигоне в море Лаптевых [10].

Однако остается открытым вопрос о природе поверхностных песчаных осадков, обнаруженных к северу от Новосибирских островов на глубинах более 200 м (станции SW-16 и SW-17), где экзарационный механизм за счет современного дрейфа айсбергов представляется нереалистичным по той причине, что толщина айсбергов, образованных на близлежащих арктических островах, как правило, не превышает 100 м. На наш взгляд, происхождение этой песчаной аномалии может быть связано с термоабразией ледового комплекса северного побережья Новосибирских островов.

В работах [28, 29] показано, что одним из факторов, контролирующих степень сохранности органического вещества в донных осадках, является удельная площадь поверхности зерен ($S_{уд}$).

Значения $S_{уд}$ устойчиво коррелируют с гранулометрическими характеристиками осадков. Среднее значение $S_{уд}$ для образцов с внутреннего шельфа составляет 26,7 м^2/г, варьируясь в широком диапазоне от 6,62 до 41,5 м^2/г; для осадков на внутреннем шельфе среднее значение равно 24,7 м^2/г (мин. 12 м^2/г, макс. 37,2 м^2/г). Наиболее низкие значения $S_{уд}$ на внешнем шельфе характерны для выделенных азональных областей. Преобладание песчаных осадков здесь снижает значение $S_{уд}$ до <10 м^2/г, в то время как глинистые осадки характеризуются значениями $S_{уд}$>25 м^2/г. Выявленный спектр изменчивости согласуется с результатами других исследований литологических характеристик донных осадков прибрежных областей [29–31].

Картина распределения $C_{орг}$ в поверхностных донных осадках, построенная с учетом результатов, полученных на внешнем шельфе в 2014 г. (рис. 3, *б*), дополняет результаты предыдущих работ авторского коллектива, выполненных в период 2000–2012 гг. (рис. 3, *а*) [9, 14]. Общее содержание $C_{орг}$ в донных осадках исследуемого региона изменяется от минимальных значений (0,27 %) в северо-восточной части моря Лаптевых до самых высоких концентраций в заливе Буор-Хая, а также в области на северо-восточной окраине Восточно-Сибирского моря (2,15 %) (рис. 3, *а*, *б*). Увеличенные концентрации $C_{орг}$ наблюдаются в прибрежной части и географически приурочены к эрозионным берегам, сложенным ледовым комплексом и дельтам

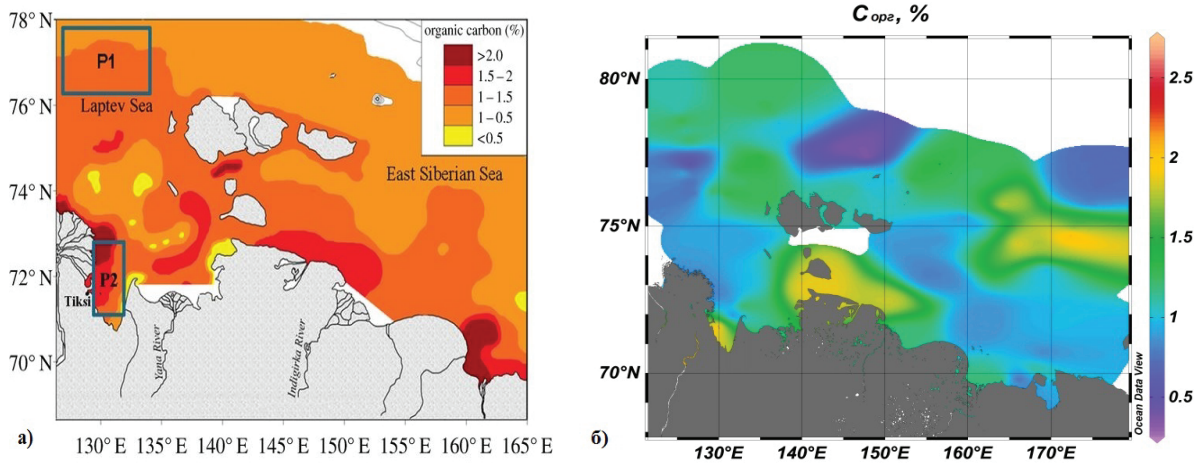

Рис. 3. *Распределение содержания $C_{орг}$ на территории ВСШ (%): а) карта, опубликованная в работе [17]; б) карта по данным авторов*

Fig. 3. *Total C_{org} distribution on ESAS surface (%): a) map published by [17]; б) authors map*

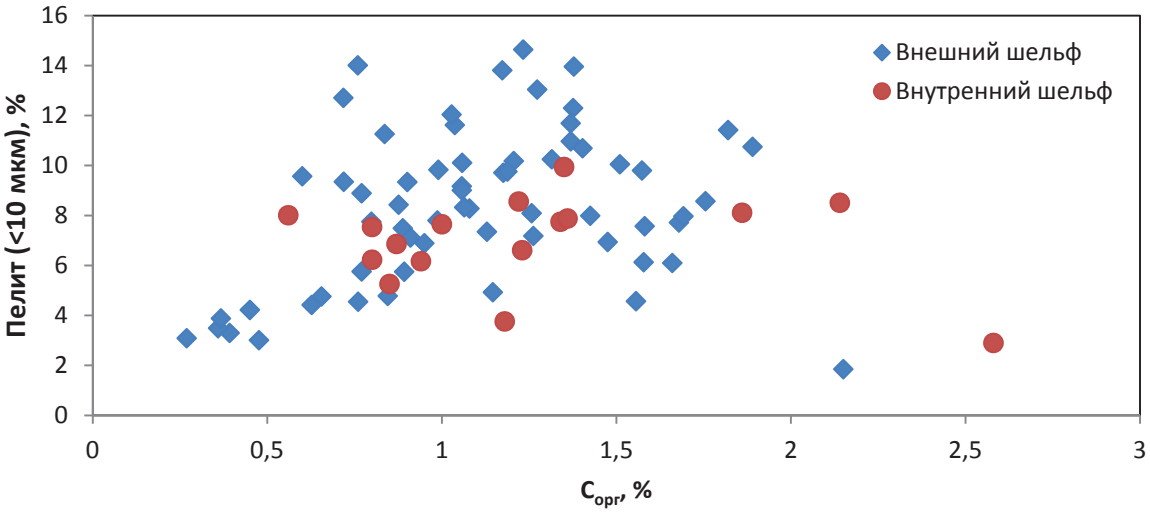

Рис. 4. *Корреляция между содержанием $C_{орг}$ (%) и долей пелитовой фракции (%) в осадках*

Fig. 4. *Plot of C_{org} vs. pelite fraction in sediments*

рек, где значимую роль играет береговая эрозия, изученная на примере авандельты реки Лены [32]. Содержание $C_{орг}$ повышается в зонах присутствия дисперсных осадков, но прямая корреляция прослеживается не везде (рис. 4). Так, осадки в районе губы Буор-Хая характеризуются относительно высоким содержанием $C_{орг}$ и разнообразным фракционным составом, что объясняется действием различных литодинамических обстановок: эрозионно-аккумулятивной и аккумулятивной террасами ее подножья. Более подробно о литодинамических особенностях этого района ВСШ можно прочитать в следующих работах [9, 33]. Повышение концентраций $C_{орг}$ также документировано в восточной части Восточно-Сибирского моря, что объясняется высокой продуктивностью трансформированных вод тихоокеанского происхождения [34].

Сохранность органического вещества в осадках контролируется целым рядом факторов, среди которых: первичная продуктивность, продолжительность нахождения в окислительных условиях, активность бентоса. Одним из наиболее широко применяемых методов для изучения механизмов «загрузки» осадков органическим веществом является определение отношения количества органического материала к их физическим характеристикам [29, 35]. Так, отношение $S_{уд}$ к общему содержанию $C_{орг}$ является параметром, позволяющим оценить общую «загрузку» осадков органическим веществом в различных условиях осадконакопления [36–38].

Принято считать, что значения данного коэффициента для осадков прибрежных фаций варьируются в пределах 0,5–1,0 мгОВ/м^2 [37]. В случае, когда значения существенно отличаются от указанного диапазона, это может свидетельствовать о высоких скоростях седиментации, что приводит к сокращению времени экспозиции органического вещества в аэробной обстановке седиментации, когда время взаимодействия органики и кислорода минимально (>>1 мгОВ/м^2), или о глубоководных условиях осадконакопления с более продолжительным периодом нахождения в окислительных условиях (<<0,5 мгОВ/м^2) [38].

Применительно к исследуемому региону на большей части акватории значения коэффициента изменяются в пределах 0,3–0,7 мгОВ/м^2 (рис. 4), что типично для континентальных склонов. Наиболее низкие коэффициенты отмечаются на глубоководных станциях, при этом в северо-восточной части Восточно-Сибирского моря и в центральной части моря Лаптевых наблюдается некоторое увеличение коэффициента, что можно объяснить транспортом наземного материала вследствие эрозии берегового ледового комплекса близлежащих островов и вымыванием легкой фракции осадков пузырьковым потоком, соответственно.

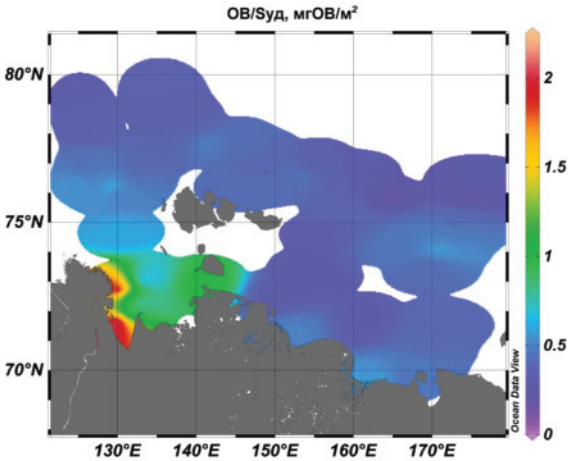

Рис. 5. *Пространственное распределение коэффициента углеродной загрузки на территории ВСШ*

Fig. 5. *Spatial distribution of carbon loadings on the ESAS*

На внутреннем шельфе, в районе авандельты реки Лена, отмечается резкое возрастание углеродной загрузки до 2,2 мгОВ/м^2 (рис. 5). Этот ра-

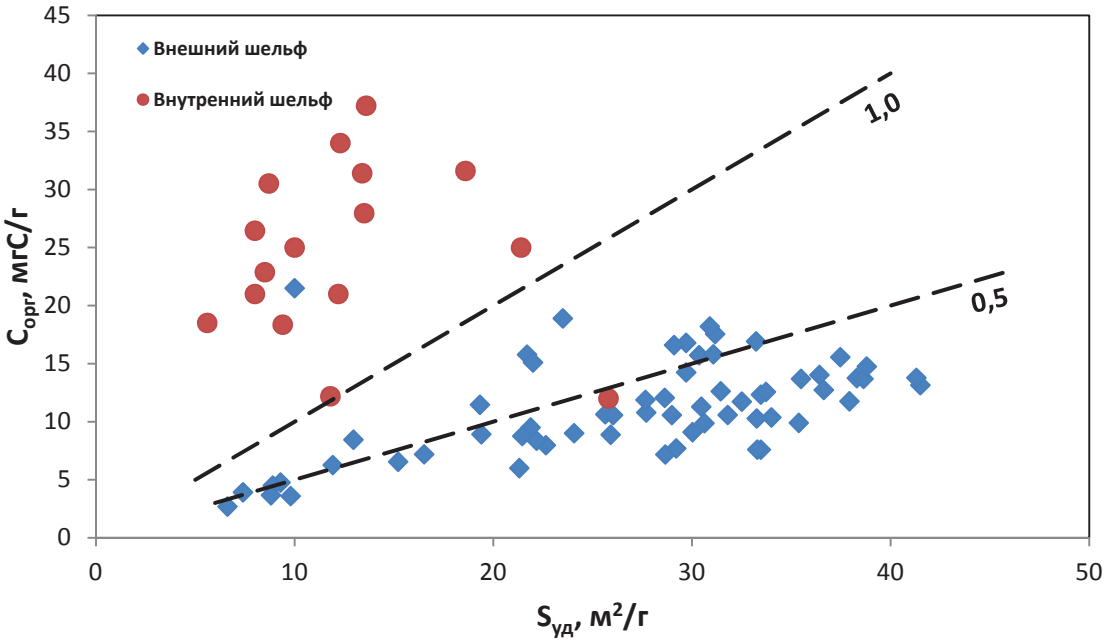

Рис. 6. *Зависимость содержания $C_{орг}$ от значения удельной площади поверхности в осадках*

Fig. 6. *C_{org} content dependence on SSA in sediments*

йон характеризуется разнородным литологическим составом, обусловленным действием различных литодинамических обстановок. Высокие значения коэффициента углеродной загрузки здесь являются результатом интенсивного экспорта наземного органического вещества в результате береговой эрозии и речного стока [33] и седиментации в условиях пониженного содержания кислорода в придонных водах [39], что, в свою очередь, вызвано потреблением кислорода на окисление органического вещества. Согласно существующим оценкам, количество взвешенного $C_{орг}$, выносимого рекой Леной за год, может достигать $0{,}38*10^{12}$ г, что во много раз меньше вклада эрозионного $C_{орг}$ [32].

Выводы

Продолжительный период подледной седиментации (8–9 месяцев в году) и наличие активных источников выноса тонкозернистого материала (эрозия берегового ледового комплекса, речной сток), перемещающегося на дальние расстояния в процессе транспортировки, обусловили накопление на исследуемой части внешнего ВСШ преимущественно дисперсных осадков. Однако на внешнем шельфе были выделены области разнородной литологической структуры, азональные районам устойчивой аккумуляции илов. Предложено несколько причин образования таких областей, среди которых современная ледовая эрозия, экзарационная деятельность палеоледников в раннем голоцене, а также интенсивная разгрузка газовых флюидов, сопровождающаяся вымыванием тонкозернистых осадков.

Распределение $C_{орг}$ в донных осадках в целом согласуется с фракционным составом. При этом на территории внешнего шельфа отмечается относительно равномерное распределение коэффициента углеродной загрузки, несмотря на выделенные азональные песчаные области в западной части и поля с повышенным содержанием $C_{орг}$ в Восточно-Сибирском море. Наиболее обогащённые органическим веществом осадки отмечаются в прибрежной области в районе губы Буор-Хая, которая характеризуется интенсивным транспортом эрозионного и речного терригенного материала.

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. Гипотеза о вымывании тонкодисперсных осадков в процессе разгрузки газовых флюидов была впервые предложена в рамках выполнения проекта РНФ № 15–17–200–32 (рук. Н.Е. Шахова). Авторы также благодарят научный коллектив лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН за помощь при подготовке работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region / C. Tarnocai, J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, S. Zimov // Global Biogeochemical Cycles. – 2009. – V. 23. – GB2023.
2. Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool / S.A. Zimov, S.P. Davydov, G.M. Zimova, A.I. Davydova, E.A. Schuur, K. Dutta, F.S. Chapin III // Geophysical Research Letters. – 2006. – V. 33. – L20502.
3. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, I. Leifer, P. Rekant, A. Salyuk, D. Kosmach // Journal of Geophysical Research. – 2010. – V. 115. DOI: 10.1029/2009JC005602.
4. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, N. Semiletov, A. Salyuk, V. Yusupov, D. Kosmach, Ö. Gustafsson // Science. – 2010. – V. 327. – P. 1246–1250.
5. Arctic Climate Impact Assessment. Arctic climate impact assessment scientific report. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005. – 1042 p.
6. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change / A.D. McGuire, L.G. Anderson, T.R. Christensen, S. Dallimore, L. Guo, D.J. Haye, M. Heimann, T.D. Lorenson, R.W. Macdonald, N. Roulet // Ecological Monographs. – 2009. – V. 79. – P. 523–555. DOI: 10.1890/08–2025.1.
7. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon / I. Semiletov, I. Pipko, Ö. Gustafsson, L.G. Anderson, V. Sergienko, S. Pugach, O. Dudarev, A. Charkin, A. Gukov, L. Bröder, A. Andersson, E. Spivak, N. Shakhova // Nature Geoscience. – 2016. – V. 9. – P. 361–365.
8. Export of calcium carbonate corrosive waters from the East Siberian Sea / L.G. Anderson, J. Ek, Y. Ericson, C. Humborg, I. Semiletov, M. Sundbom, A. Ulfsbo // Biogeosciences. – 2017. – V. 14. – P. 1811–1823.
9. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, Ö. Gustafsson, V. Sergienko, L. Lobkovsky, O. Dudarev, V. Tumskoy, M. Grigoriev, A. Mazurov, A. Salyuk, R. Ananyev, A. Koshurnikov, D. Kosmach, A. Charkin, N. Dmitrevsky, V. Karnaukh, A. Gunar, A. Meluzov, D. Chernykh // Nature Communications. – 2017. – V. 8. – 15872. DOI: 10.1038/ncomms15872.
10. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice / N. Shakhova, I. Semiletov, V. Sergienko, L. Lobkovsky, V. Yusupov, A. Salyuk, A. Salomatin, D. Chernykh, D. Kosmach, G. Panteleev, D. Nicolsky, V. Samarkin, S. Joye, A. Charkin, O. Dudarev, A. Meluzov, Ö. Gustafsson // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2015. – V. 373. – DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
11. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Carbon Cycle in the Russian Arctic Seas. – Berlin: Springer, 2004. – 331 p.
12. An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses / M. Jakobsson, R. Macnab, L. Mayer, R. Anderson, M. Edwards, J. Hatzky, H.W. Schenke, P. Johnson // Geophysical Research Letters. – 2008. – V. 35. – L07602. DOI: 10.1029/2008GL033520.
13. Jakobsson M. Hypsometry and volume of the Arctic Ocean and its constituent seas // Geochemistry Geophysics Geosystems. – 2002. – V. 3. – P. 1–18.
14. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России: монография / О.В. Дударев и др. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 192 с.
15. Семенов Ю.П., Шкатов Е.П. Геоморфология дна моря Лаптевых // Геология моря. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – Вып. 1. – С. 211–218.
16. Stein R., Macdonald R.W. Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. Global Ocean // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. – Berlin: Springer Verlag, 2004. – P. 315–322.
17. Никифоров С.Л. Подводные аккумулятивные формы на шельфе Восточно-Сибирского моря // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. – М.: Наука, 1985. – С. 96–101.
18. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // Journal of the American Chemical Society. – 1938. – V. 60. – P. 309–319.
19. Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки арктических морей России // под ред. И.С. Грамберг. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. – 286 с.
20. Арктический шельф: позднечетвертичная история как основа прогноза развития / Ю.А. Павлидис, А.С. Ионин, Ф.А. Щербаков, Н.Н. Дунаев. – М.: ГЕОС, 1998. – 187 с.
21. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл органического углерода в арктических морях России. – М.: Наука, 2001. – 302 с.
22. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года / В.И. Сергиенко и др. // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 446. – № 3. – С. 330–335.
23. Лисицын А.П. Ледовая седиментация в Мировом океане. – М.: Наука, 1994. – 448 с.
24. Barnes P.W., Reimnitz E., Fox D. Ice-rafting of fine-grained sediment, a sorting and transport mechanism, Beaufort Sea, Alaska // Journal of Sedimentary Petrology. – 1982. – V. 52 – № 2. – P. 493–502.
25. О процессах газовыделения и деградации подводных многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых / Л.И. Лобковский, С.Л. Никифоров, Н.Н. Дмитриевский, Н.В. Либина, И.П. Семилетов, Р.А. Ананьев, А.А. Мелузов, А.Г. Росляков // Океанология. – 2015. – Т. 55. – № 2. – С. 312–320.
26. Evidence for an ice shelf covering the central Arctic Ocean during the penultimate glaciation / M. Jakobsson, J. Nilsson, L. Anderson, J. Backman, G. Bjork, T.M. Cronin, N. Kirchner, A. Koshurnikov, L. Mayer, R. Noormets, M. O'Regan, C. Stranne, R. Ananiev, M. Barrientos Macho, D. Chernykh, H. Coxall, B. Eriksson, T. Floden, L. Gemery, O Gustafsson., K. Jerram, K. Johansson, A. Khortov, R. Mohammad, I. Semiletov // Nature Communications. – 2016. – V. 7. – 10365. DOI: 10.1038/ncomms10365.
27. De Long Trough: A newly discovered glacial trough on the East Siberian Continental Margin / M. O'Regan, J. Backman, N. Barrientos, T.M. Cronin, G. Laura, N. Kirchner, L.A. Mayer, J. Nilsson, R. Noormets, C. Pearce, I. Semiletov, C. Stranne, M. Jakobsson // Climate of the Past. – 2017. DOI: org/10.5194/cp-2017–56.
28. Aller R.C., Blair N.E. Carbon remineralization in the Amazon-Guianas tropical mobile mudbelt: A sedimentary incinerator // Continental Shelf Research. – 2006. – V. 26. – P. 2241–2259.
29. Hedges J.I., Keil R.G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis // Marine Chemistry. – 1995. – V. 49. – P. 81–115.
30. The effect of grain size and surface area on organic matter, lignin and carbohydrate concentration, and molecular compositions in Peru Margin sediments / B.A. Bergamaschi, E. Tsamakis, R.G. Keil, T.I. Eglinton, D.B. Montlucon, J.I. Hedges // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1997. – V. 61 (6). – P. 1247–1260.
31. Distribution and sources of organic matter in surface marine sediments across the North American Arctic margin / M.A. Goñi, A.E. O'Connor, Z.A. Kuzyk, M.B. Yunker, C. Gobeil, R.W. Macdonald // Journal of Geophysical Research. – 2013. – V. 118 (9). – P. 4017–4035.
32. Григорьев М.Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: автореф. дис. ... д-ра наук. – Якутск, 2008. – 40 с.

33. 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 / A.N. Charkin, O.V. Dudarev, I.P. Semiletov, A.V. Kruhmalev, J.E. Vonk, L. Sánchez-García, E. Karlsson, O. Gustafsson // Biogeosciences. – 2011. – V. 8 (9). – P. 581–594.
34. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters / I. Semiletov, O. Dudarev, V. Luchin, A. Charkin, K.-H. Shin, N. Tanaka // Geophysical Research Letters. – 2005. – V. 32. – L10614. DOI: 10.1029/2005GL022490.
35. Keil R.G., Mayer L.M. Mineral matrices and organic matter // Treatise on Geochemistry / Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. – Oxford: Elsevier, 2014. – P. 337–359.
36. Blair N.E., Aller R.C. The fate of terrestrial organic carbon in the Marine environment // Annual Review of Marine Science. – 2012. – V. 4. – P. 401–423.
37. Mayer L.M. Surface-area control of organic-carbon accumulation in continental-shelf sediments // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1994. – V. 58. – P. 1271–1284.
38. Sorptive preservation of labile organic-matter in marine sediment / R.G. Keil, D.B. Montlucon, F.G. Prahl, J.I. Hedges // Nature. – 1994. – V. 370 (6490). – P. 549–552.
39. Савельева Н.И., Салюк А.Н, Пропп Л.Н. Особенности термохалинной и гидрохимической структуры вод юго-восточной части моря Лаптевых // Океанология. – 2010. – Т. 50. – № 6. – С. 918–925.

Поступила 25.08.2017 г.

Информация об авторах

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

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

Дударев О.В., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук; научный сотрудник Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Тези Т., PhD, научный сотрудник Института Морских Наук Итальянского Национального Исследовательского Совета.

Брёдер Л., PhD, постдок кафедры наук о Земле и климате Свободного университета Амстердама.

Густафссон О., профессор кафедры наук об окружающей среде и аналитической химии, Стоегольмского университета.

Гринько А.А., кандидат химических наук, научный сотрудник Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шахова Н.Е., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гончаров И.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Семилетов И.П., доктор географических наук, член-корреспондент Российской Академии наук, заведующий Лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии; профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.4:552.14

LITHOLOGICAL FEATURES OF SURFACE SEDIMENT AND THEIR INFLUENCE ON ORGANIC MATTER DISTRIBUTION ACROSS THE EAST-SIBERIAN ARCTIC SHELF

Elena V. Panova[1],
elenapanova@tpu.ru

Alexey S. Ruban[1],
ruban@tpu.ru

Oleg V. Dudarev[2,1],
dudarev@poi.dvo.ru

Tommaso Tesi[3],
tommaso.tesi@bo.ismar.cnr.it

Lisa Broöder[4],
elenapanova@tpu.ru

Örjan Gustafsson[5],
Orjan.Gustafsson@aces.su.se

Andrey A. Grinko[1],
grinko@tpu.ru

Natalia E. Shakhova[1],
shahova@tpu.ru

Ivan V. Goncharov[1],
GoncharovIV@tomsknipi.ru

Alexey K. Mazurov[1],
akm@tpu.ru

Igor P. Semiletov[2,1],
igorsm@iarc.uaf.edu

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

[2] Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences,
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia.

[3] Institute of Marine Sciences, National Research Council (ISMAR-CNR), Via Gobetti,
101, Bologna, 40129, Italy.

[4] Department of Earth and Climate, Vrije Universiteit Amsterdam (VU), De Boelelaan,
1105, 1081 HV Amsterdam, Netherlands.

[5] Department of Environmental Science and Analytical Chemistry (ACES), Stockholm University,
8, Svante Arrhenius väg, Stockholm, 114 18, Sweden.

The Arctic is undergoing rapid climate change, which affects the global and regional carbon cycles. The East Siberian Arctic shelf, that is believed to store huge amounts of organic carbon in different pools, has been the subject of growing scientific interest in recent decades.

The aim *of the work was to study the lithological features of bottom sediments on the East Siberian Arctic shelf and to assess their influence on the spatial distribution of organic material in the study area.*

Materials and methods. *The sediment samples were collected during the 45-day multidisciplinary SWERUS-C3 expedition on IB ODEN in summer 2014. Surface sediments from inner and middle East Siberian Arctic shelf were collected in summer 2008 during the International Siberian Shelf Study (ISSS-08) campaign onboard the HV Yakob Smirnitsky. The samples were analyzed for the grain size and specific surface area characteristics and total organic carbon content.*

It is shown that the subglacial sedimentation and the accumulation of predominantly fine-grained sediments prevail within the study area. Nevertheless, atypical sand zones were identified on the outer shelf. The authors have suggested several external factors, including modern and paleo ice scouring in the early Holocene, and intensive gas venting, which are accompanied by removal of fine-grained se-

diments. The paper considers spatial distribution of organic matter in the bottom sediments of the East Siberian Arctic shelf and its interrelation with their lithological properties.

Key words:
East Siberian Arctic shelf, Laptev Sea, East Siberian Sea, bottom sediments, organic carbon, specific surface area.

The study was carried out at the International Scientific and Educational Laboratory of the Arctic Seas Carbon Study, established with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (under the contract no. 14.Z50.31.0012, led by I.P. Semiletov) at the National Research Tomsk Polytechnic University. The hypothesis of fine-grained sediments removal during the active gas venting was originated and proposed in frame of the project led by N.E. Shakhova supported by the Russian Scientific Foundation (grant no. 15–17–200–32). The authors thank the research team from the Arctic Studies Laboratory of the V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for productive cooperation.

REFERENCES

1. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, vol. 23, GB2023.
2. Zimov S.A., Davydov S.P., Zimova G.M., Davydova A.I., Schuur E.A., Dutta K., Chapin F.S. III. Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, L20502.
3. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf. *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol. 115. DOI: 10.1029/2009JC005602.
4. Shakhova N., Semiletov N., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010, vol. 327, pp. 1246–1250.
5. Arctic Climate Impact Assessment. *Arctic climate impact assessment scientific report*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2005. 1042 p.
6. McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecological Monographs*, 2009, vol. 79, no. 4, pp. 523–555. DOI: 10.1890/08–2025.1.
7. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., Anderson L.G., Sergienko V., Pugach S., Dudarev O., Charkin A., Gukov A., Bröder L., Andersson A., Spivak E., Shakhova N. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon. *Nature Geoscience*, 2016, vol. 9, pp. 361–365.
8. Anderson L.G., Ek J., Ericson Y., Humborg C., Semiletov I., Sundbom M., Ulfsbo A. Export of calcium carbonate corrosive waters from the East Siberian Sea. *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, pp. 1811–1823.
9. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson Ö., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskoy V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk, A., Ananyev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, 15872. DOI: 10.1038/ncomms15872.
10. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson Ö. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2015, vol. 373. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
11. Vetrov A.A., Romankevich E.A. *Carbon Cycle in the Russian Arctic Seas*. Berlin, Springer, 2004. 331 p.
12. Jakobsson M., Macnab R., Mayer L., Anderson R., Edwards M., Hatzky J., Schenke H.W., Johnson P. An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses. *Geophysical Research Letters*, 2008, vol. 35, L07602. DOI: 10.1029/2008GL033520.
13. Jakobsson M. Hypsometry and volume of the Arctic Ocean and its constituent seas. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2002, vol. 3, pp. 1–18.
14. Dudarev O. V. *Sovremenny litomorfogenez na Vostochno-arkticheskom shelfe Rossii: monografiya* [Modern lithomorphogenesis processes on the East Siberian Arctic shelf]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2016. 192 p.
15. Semenov Yu.P., Shkatov E.P. Geomorfologiya dna morya Laptevykh [Geomorphology of the Laptev sea bottom]. *Russian Marine Geology*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1971. Iss. 1, pp. 211–218.
16. Stein R., Macdonald R.W. Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. Global Ocean. *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Berlin, Springer Verlag, 2004, pp. 315–322.
17. Nikiforov S.L. Podvodnye akkumulyativnye formy na shelfe Vostochno-Sibirskogo morya [Underwater accumulative forms on the East Siberian Arctic shelf]. *Geologiya i geomorfologiya shelfov i materikovykh sklonov* [Geology and geomorphology of shelves and continental slopes]. Moscow, Nauka Publ., 1985. pp. 96–101.
18. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 1938, vol. 60, pp. 309–319.
19. Kosheleva V.A., Yashin D.S. *Donnye osadki arkticheskikh morey Rossii* [Bottom sediments of Russian Arctic seas]. Ed. by I.S. Gramberg. Moscow. VNIIOkeanologiya Publ., 1999. 286 p.
20. Pavlidis Yu.A. *Arkticheskiy shelf: pozdnechetvertichnaya istoriya kak osnova prognoza razvitiya* [Arctic shelf: Late Quaternary history as a basis for forecast]. Moscow, GEOS Publ., 1998. 187 p.
21. Romankevich E.A., Vetrov A.A. *Tsikl organicheskogo ugleroda v arkticheskikh moryakh Rossii* [Organic carbon cycle in Russian Arctic seas]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 302 p.
22. Sergienko V.I. 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. *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 1132–1137. In Rus.
23. Lisitsyn A.P. *Ledovaya sedimentatsiya v Mirovom okeane* [Ice sedimentation in World Ocean]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 448 p.
24. Barnes P.W., Reimnitz E., Fox D. Ice-rafting of fine-grained sediment, a sorting and transport mechanism, Beaufort Sea, Alaska. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, vol. 52, no. 2, pp. 493–502.
25. Lobkovskiy L.I., Nikiforov S.L., Libina N.V., Ananev R.A., Meluzov A.A., Roslyakov A.G., Dmitrievskiy N.N., Semiletov I.P.

Gas extraction and degradation of the submarine permafrost rocks on the Laptev Sea shelf. *Oceanology*, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 283–290. In Rus.
26. Jakobsson M., Nilsson J., Anderson L., Backman J., Bjork G., Cronin T.M., Kirchner N., Koshurnikov A., Mayer L., Noormets R., O'Regan M., Stranne C., Ananiev R., Barrientos Macho M., Chernykh D., Coxall H., Eriksson B., Floden T., Gemery L., Gustafsson O., Jerram K., Johansson K., Khortov A., Mohammad R., Semiletov I. Evidence for an ice shelf covering the central Arctic Ocean during the penultimate glaciation. *Nature Communications*, 2016, vol. 7, 10365. DOI: 10.1038/ncomms10365.
27. O'Regan M., Backman J., Barrientos N., Cronin T.M., Laura G., Kirchner N., Mayer L.A., Nilsson J., Noormets R., Pearce C., Semiletov I., Stranne C., Jakobsson M. De Long Trough: a newly discovered glacial trough on the East Siberian Continental Margin. *Climate of the Past*, 2017. DOI: org/10.5194/cp-2017–56.
28. Aller R.C., Blair N.E. Carbon remineralization in the Amazon-Guianas tropical mobile mudbelt: A sedimentary incinerator. *Continental Shelf Research*, 2006, vol. 26, pp. 2241–2259.
29. Hedges J.I., Keil R.G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis. *Marine Chemistry*, 1995, vol. 49, pp. 81–115.
30. Bergamaschi B.A., Tsamakis E., Keil R.G., Eglinton T.I., Montlucon D.B., Hedges J.I. The effect of grain size and surface area on organic matter, lignin and carbohydrate concentration, and molecular compositions in Peru Margin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, vol. 61 (6), pp. 1247–1260.
31. Goñi M.A., O'Connor A.E., Kuzyk Z.A., Yunker M.B., Gobeil C., Macdonald R.W. Distribution and sources of organic matter in surface marine sediments across the North American Arctic margin. *Journal of Geophysical Research*, 2013, vol. 118 (9), pp. 4017–4035.
32. Grigorev M.N. *Kriomorfogenez i litodinamika pribrezhno-shelfovoy zony morey Vostochnoy Sibiri. Avtoreferat dissertatsii doktora nauk* [Cryomorphogenesis and lithodynamics of coastal shelf zone of East Siberian seas. Dr. Sc. Diss. Abstract]. Yakutsk, 2008. 40 p.
33. 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 southeast Laptev Sea. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8 (9), pp. 581–594.
34. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters / I. Semiletov, O. Dudarev, V. Luchin, A. Charkin, K.-H. Shin, N. Tanaka. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, L10614. DOI: 10.1029/2005GL022490.
35. Keil R.G., Mayer L.M. Mineral matrices and organic matter. *Treatise on Geochemistry*. Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. Oxford, Elsevier, 2014, pp. 337–359.
36. Blair N.E., Aller R.C. The fate of terrestrial organic carbon in the Marine environment. *Annual Review of Marine Science*, 2012, vol. 4, pp. 401–423.
37. Mayer L.M. Surface-area control of organic-carbon accumulation in continental-shelf sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, vol. 58, pp. 1271–1284.
38. Keil R.G., Montlucon D.B., Prahl F.G., Hedges J.I. Sorptive preservation of labile organic-matter in marine sediment. *Nature*, 1994, vol. 370 (6490), pp. 549–552.
39. Savelieva N.I., Salyuk A.N, Propp L.N. Peculiar features of the thermohaline and hydrochemical water structure in the southeastern Laptev Sea. *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 918–925. In Rus.

Received: 25 August 2017.

Information about the authors

Elena V. Panova, teaching assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey S. Ruban, teaching assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg V. Dudarev, Dr. Sc., senior researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences; researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Tommaso Tesi, PhD, researcher, Institute of Marine Sciences, National Research Council (ISMAR-CNR).

Lisa Bröder, PhD, postdoc, Department of Earth and Climate, Vrije Universiteit Amsterdam (VU).

Örjan Gustafsson, PhD, professor, Department of Environmental Science and Analytical Chemistry (ACES), Stockholm University.

Andrey A. Grinko, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia E. Shakhova, Dr. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ivan V. Goncharov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Igor P. Semiletov, Dr. Sc., professor, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.