

УДК 551.35:551.435.4

## ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА: ОПЫТ СИСТЕМНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

© 2015 г. А. С. Ульянов<sup>1</sup>, Л. И. Лобковский<sup>1</sup>, А. В. Жаворонков<sup>1</sup>, Е. А. Романкевич<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: uleg85@gmail.com

Поступила в редакцию 05.06.2015 г.

На примере результатов системных геолого-геохимических исследований мелководного шельфа моря Лаптевых продемонстрирована выраженная неоднородность его формирования. Выявлено значительное засоление надмерзлотных лагунных толщ, что усиливает солевой эффект протаивания мерзлых пород. Тенденция укрупнения частиц отложений также является предпосылкой усиления таяния мерзлоты. Вариации содержания органического углерода отражают значимый вклад термоабразии и речного стока в поставку органического вещества и формирование осадочной толщи. Разработана и внедрена комплексная программа геолого-геохимических исследований отложенных колонкового бурения на шельфе. Программа включает методы отбора проб и пробоподготовки, литологического, химического, изотопного анализов, системную интерпретацию результатов экспедиционных и экспериментальных наблюдений.

DOI: 10.7868/S0030157415060209

### ВВЕДЕНИЕ

Особенности системы арктического шельфа определяют актуальность его комплексного изучения в условиях активного таяния подводной мерзлоты, разрушения газовых гидратов и метановой разгрузки [4, 8, 13–15]. Климатические, инженерные, геолого-геохимические риски при быстрых изменениях арктической среды общепризнаны и активно изучаются в настоящее время [4, 8, 13, 14, 20]. Внимание к изучению этого вопроса усиливается при разработках месторождений нефти и газа, проведении разведывательных и монтажных работ, создании и развитии инфраструктуры, эксплуатации Северного морского пути, а также в связи с геополитическими аспектами спорных акваторий [1, 3]. Современное состояние морей Российской Арктики и всего Северного Ледовитого океана характеризуется изменением практически всех параметров экосистем и биогеохимических круговоротов веществ, в том числе ключевого — цикла углерода [6, 16, 19].

Рифтовая система моря Лаптевых характеризуется высокой современной активностью (георазломы, термодеструкция, карстовые процессы) [9]. Для морфолитогенеза этого перигляциального шельфа характерна выраженность флювиогляциальных процессов и криогенеза, обусловившего существование обширной подводной криолитозоны [5, 7, 9]. Метан, выделяющийся из газогидратов Восточно-Арктического шельфа, рассмат-

ривается в качестве одной из наиболее реалистичных причин быстрых климатических изменений в Арктике [14, 15]. Текущие климатические изменения и постепенная деградация подводной шельфовой криолитозоны морей Восточной Арктики усиливают геологические риски, что акцентирует внимание на его изучении [2, 11, 14, 15, 20].

Для решения возникающих при исследовании арктического шельфа проблем была разработана комплексная программа геолого-геохимических исследований, включающая методы отбора проб и пробоподготовки, химического и литологического анализа, системную интерпретацию результатов экспедиционных натурных и экспериментальных наблюдений. Целью настоящей работы была реализация разработанной программы и выявление особенностей формирования и строения осадочной толщи мелководного шельфа моря Лаптевых.

Важной особенностью формирования и строения осадочной толщи Восточно-Арктического шельфа является проявление двух типов криогенеза: сингенеза и эпигенеза [7, 9]. Сингенетические отложения формируются в процессе одновременного осадконакопления и перехода в многолетнемерзлое состояние. Промерзание же эпикриогенных отложений происходит после их накопления и ранних стадий диагенеза. Синкриогенные отложения распространены в пределах первых 100 метров толщ и приурочены к аккумулятивным формам рельефа, и по генезису

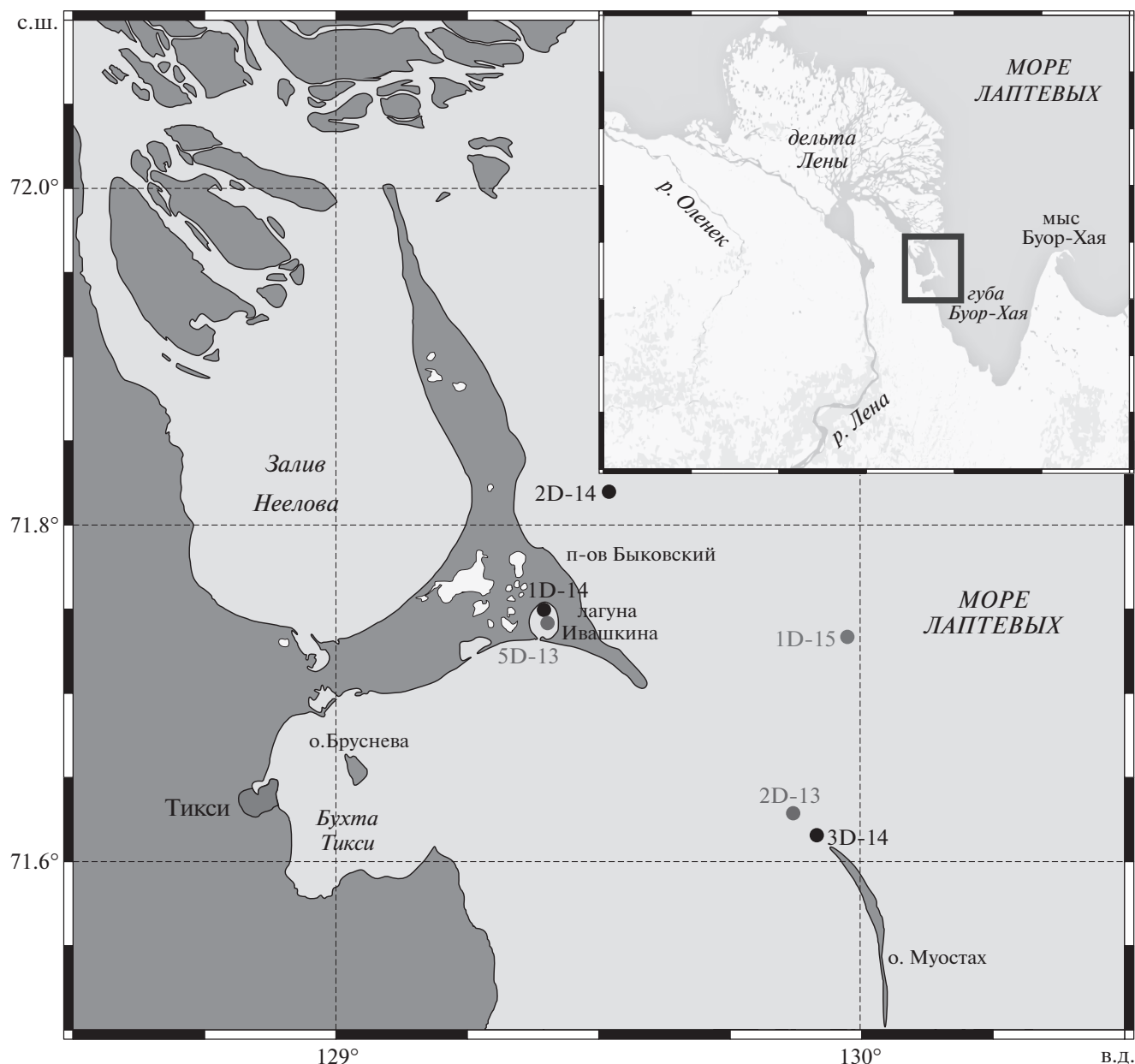


Рис. 1. Карта-схема района исследований. Отмечено расположение пробуренных скважин.

преимущественно континентальные. Их геологический и криогенный возраст совпадают (от раннего плейстоцена до голоцена). Этот тип отложений сформировался и существует в условиях криолитозоны, отличаются высокой льдистостью и специфичным криогенным строением. Они в первую очередь подвержены ледовому термокарсту и многолетнему оттаиванию, в результате чего трансформируются в таберальные и таберированные образования [7]. Эпикриогенный тип объединяет самые разнообразные по составу, генезису и возрасту отложения. Мощность эпикриогенных отложений достигает 1–2 км, они могут

составлять как целый разрез мерзлых толщ, так и подстилать синкриогенные отложения. Криогенный возраст этого типа отложений изменяется от раннего плейстоцена до позднего голоцена, геологический возраст, в свою очередь, всегда выше криогенного [7].

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования послужили пробы отложений буровой колонки 1D-14, полученной в ходе полярно-ледовой экспедиции в районе губы Буор-Хая в 2014 г. (рис. 1). Пробы та-

лых и мерзлых отложений предварительно гомогенизировались и отбирались в пластиковые пакеты, далее замораживались и транспортировались. Сушка проб проводилась в сушильном шкафу при температуре  $+60^{\circ}\text{C}$  в течение 48 часов. Далее пробы измельчали в ступке, просеивали и квартовали.

Определение содержания органического углерода проведено в высушенных квартованных пробах методом высокотемпературного сжигания на анализаторе Eurovector-EA3000. Определение гранулометрического состава проведено в пробах естественной влажности методом малоуглового лазерного светорассеяния на анализаторе частиц Mastersizer 2000 ("Малверн Инструментс", Великобритания) в соответствии с международным стандартом ISO 13320. Частицы крупнее 0.1 мм удалялись из пробы мокрым рассевом и анализировались ситовым методом после высушивания до постоянной массы. Частицы менее 0.1 мм в диаметре анализировались на анализаторе частиц с использованием жидкостного модуля диспергирования Nudro 2000S при постоянном перемешивании и ультразвуковом воздействии.

Анализ на содержание катионов и анионов проводился в водных вытяжках из проб. Водные вытяжки получали в соответствии с РД 52.18.572-96. Определение анионов проводили методом ионообменной хроматографии на анализаторе DIONEX ICS-5000 с использованием колонки и предколонки PAX-100. Содержание катионов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на анализаторе Shimadzu AA-7000. Конечные результаты пересчитывали с учетом разведения проб и естественной влажности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

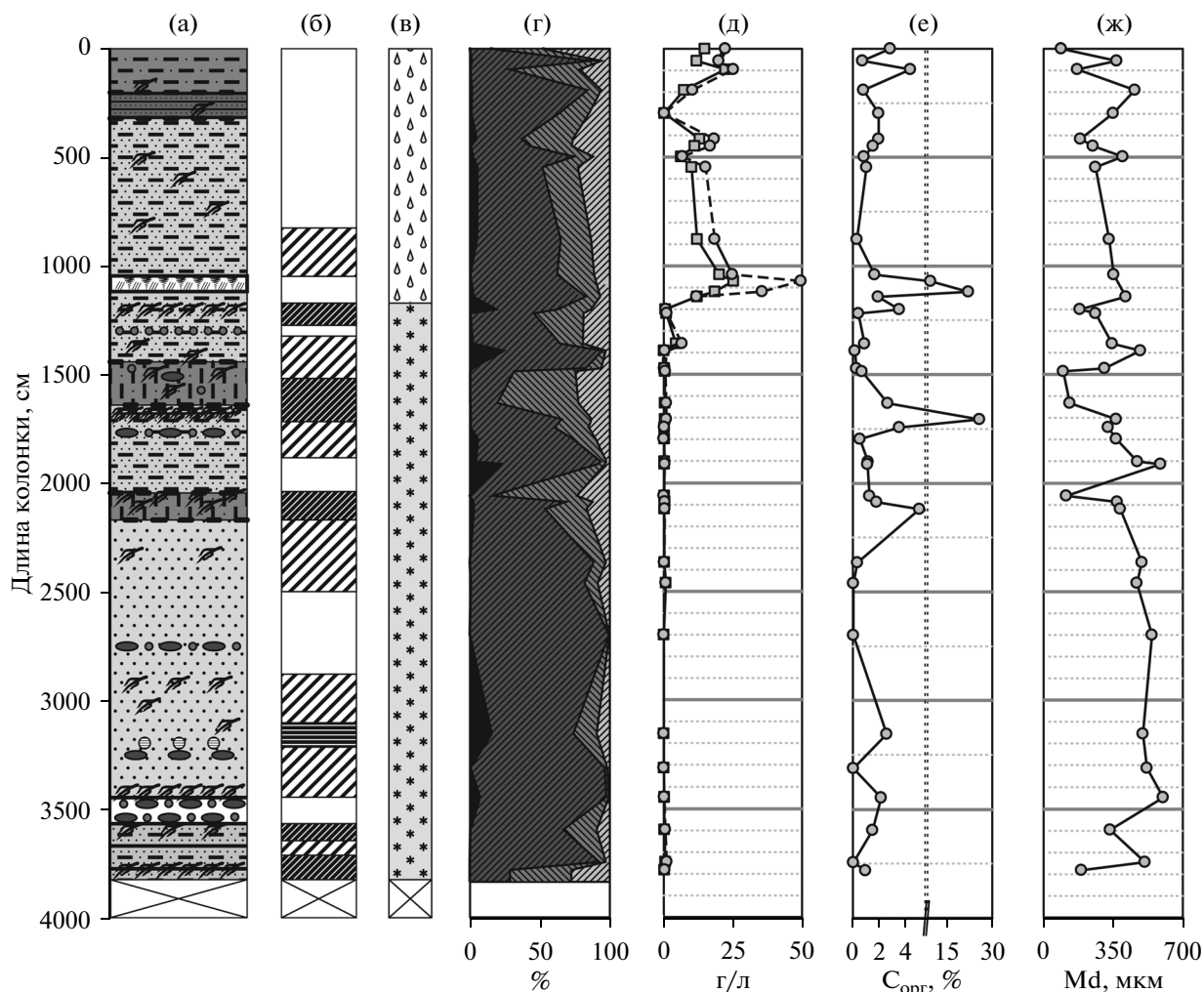
В ходе системного изучения материалов колонкового бурения с припайного льда в районе губы Буор-Хая (море Лаптевых) был получен ряд важных результатов. На примере буровой колонки 1D-14, взятой в Ивашкиной лагуне полуострова Быковский в море Лаптевых, продемонстрировано большое разнообразие типов отложений (рис. 2). Колонка сложена преимущественно низкокарбонатными песками и алевроитами различной дисперсности. Первые 10 метров колонки представлены заиленными оводненными песками и алевроитами темно-серого цвета и являются результатом переотложения ледового комплекса, ведущим механизмом которого является термоабразия, усиливающаяся в связи с затоплением лагуны и усилением разгрузки Быковской протоки Лены [9]. Образование самой лагуны связано с проседанием оттаявших отложений ледового комплекса. Слоистость этого слоя неясна или отсутствует, местами встречаются наклонные прослои. Ниже встречаются отдельные мощные

слои алевроита и песка с гравийно-галечными включениями. Отмечается выраженная слоистость отдельных участков колонки, которая имеет естественный характер и свидетельствует о динамичной потоковой среде осадконакопления. Большое содержание древесных и растительных остатков вносит основной вклад в пул органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) колонки, а также отражает потоковую гидродинамическую обстановку осадконакопления. Среднее содержание  $C_{\text{орг}}$  в колонке составило 2.85%.

Фашиальный анализ позволил характеризовать толщу колонки 1D-14 как полифашиальную с точки зрения геолого-геохимических показателей. Голоценовые отложения обогащены органическим веществом, поступающим с остатками разрушающегося ледового комплекса. Слои лагуновых осадков подстилают собственно оттаявшие отложения ледового комплекса, сформировавшегося в суровых климатических условиях верхнего плейстоцена [9, 10]. Фашии переходного типа с глубиной сменяются континентальными. Мощный слой растительного детрита (1037–1117 см) свидетельствует о формировании пастбищного ландшафта в плейстоцене. Ниже залегают мощные песчаные аллювиальные толщи, ведущим механизмом образования которых была седиментация песчаного материала, принесенного палеорекой. Наличие рассеянного гравийно-галечного материала свидетельствует в пользу его речного выноса в составе льдов.

Над кровлей многолетнемерзлых пород в Ивашкиной лагуне сформирована область повышенной солёности поровой воды, чему способствуют наличие высокопористого слоя растительного детрита и диффузия. Являясь специфичной жидкой средой, поровая вода способствует вертикальной и латеральной миграции растворенных в ней солей, что, в конечном счете, выражается в виде солевого эффекта протаивания, основной вклад в который вносят миграция солей, поступающих с морской водой, грунтовым стоком и глубинными флюидами. Значительное засоление толщи отложений наряду с общей тенденцией укрупнения частиц с глубиной является предпосылкой усиления солевого эффекта протаивания мерзлоты. С общим ростом размеров частиц улучшаются дренажные характеристики толщи отложений, что также будет способствовать протаиванию подводных многолетнемерзлых пород.

В ряде случаев комплексная интерпретация данных затрудняется ввиду особенностей района исследования. В различные геологические периоды геодинамическая обстановка рельефообразования и осадконакопления современного Восточно-Арктического шельфа значительно изменялась в пространственно-временном масштабе, что приводило к формированию множества ти-



- (a)
- Алеврито-пелитовый ил с примесью песка
  - Песок пелитисто-алевритистый
  - Песок чистый
  - Слой почвенно-растительный
  - Галька
  - Глинистые окатыши
  - Песок алевритисто-пелитистый
  - Алеврит песчанистый
  - Песок алевритовый с примесью пелита
  - Древесные остатки
  - Гравий
  - Резкие границы между слоями
  - Постепенные переходы между слоями

- (б)
- Текстура неслоистая
  - Текстура сильнослоистая наклонная
  - Текстура слоистая наклонная
  - Текстура слоистая прямая
- (в)
- Оттаявшие отложения
  - Мерзлые отложения
- (г)
- Гравий (1–5 мм)
  - Алеврит (0.01–0.1 мм)
  - Песок (0.1–1 мм)
  - Пелит (<0.01 мм)
- (д)
- Ионы Na<sup>+</sup>
  - Ионы Cl<sup>-</sup>

Рис. 2. Характеристики колонки 1D-14. а – литологическое описание; б – текстурные особенности; в – криогенное состояние; г – массовое содержание гранулометрических фракций; д – концентрация ионов в поровой воде; е – содержание органического углерода; ж – медианный диаметр частиц.



**Рис. 3.** Пример термоабразии ледового комплекса на полуострове Быковский. Видно обнажение сингенетической ледовой жилы. (Фото А.С. Ульянцева).

пов геологических структур и фаций. Это связано, в первую очередь, с климатическими изменениями в Арктике в поздечетвертичное время, сопровождаемыми значительными колебаниями уровня Северного Ледовитого океана. Следует отметить криолитологические особенности формирования и строения Восточно-Арктического шельфа, к которым относится существование и широкое распространение особой геокриологической формации – ледового комплекса (рис. 3). Единого определения понятия “ледовый комплекс” до сих пор нет, и проблема генезиса и возраста отложений этой формации остается дискутируемой [10]. Чаще всего рассматривается средне- и верхнеплейстоценовый возраст ледового комплекса, отложение которого происходило преимущественно по синкриогенному типу в субаэральных условиях [5, 7, 9]. Осадочный материал, как правило, целиком переотложен и представлен песками и ледово-лессовыми отложениями с включениями почвенно-растительных слоев и торфа. Не следует путать понятия “ледовый комплекс” и “многолетнемерзлые породы”. Термин “ледовый комплекс” является геоморфологическим понятием и относится к определенному геохронологическому периоду. Термин “много-

летнемерзлые породы” геокриологический и характеризует криогенное состояние толщи независимо от возраста.

В результате термокарстовых процессов происходит таяние высокольдистых отложений ледового комплекса. Под давлением вышележащих толщ вода, образованная в результате таяния повторно-жильных льдов, латерально покидает толщу отложений, что сопровождается значительным проседанием осадочного чехла. Таким образом формируются аласные, лагунные и озерные фации, широко распространенные на континентальной части Восточно-Арктического шельфа [9]. В итоге отложения полностью или частично теряют начальные структурно-текстурные и криогенные характеристики и приобретают новые. В результате формируются термокарстовые таберальные образования [7]. Они характеризуются перемещением биогенной и минеральной составляющей в толще, изменением геохимической обстановки, образованием новых аутигенных минералов и отличаются низким содержанием влаги, уплотненностью, зачастую перемешаны с вышележащими слоями отложений.

Оценка абсолютного и относительного возраста исследованных отложений также вызывает ряд трудностей. Эта проблема вызвана плохой сохранностью микрофоссилий в аллювиальных песках, представляющих основную массу осадочной толщи. Такая же проблема возникает при палинологическом анализе. С другой стороны, разнообразие геодинамических обстановок осадконакопления и значительное переотложение осадочного материала не позволяют однозначно судить о возрасте отложений. С массивным речным стоком в море Лаптевых, в первую очередь с Леной, приносится большое количество термоабразионного осадочного материала, который перезахоранивается, образуя так называемые “немые толщи”, мощность которых может достигать нескольких метров. Учитывая площадь водосбора и характеристики питающих водотоков, свойства осадочного материала, поступавшего в толщу прибрежных отложений моря Лаптевых, однозначно интерпретировать результаты палинологического анализа проблематично. Возраст растительных остатков в большинстве случаев превышает верхний предел радиоуглеродного метода.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере Ивашкиной лагуны продемонстрирована значительная вариабельность вещество-генетического, гранулометрического и геохимического состава шельфовых отложений моря Лаптевых. Это обусловлено близостью расположения исследованной буровой колонки к современной дельте Лены и другими морфолито-структурными факторами. Рост медианного диаметра частиц с глубиной можно связать с изменениями гидрологического режима протекавшей в исследуемом районе палеореки (предположительно пра-Лены). Основными гидродинамическими факторами в этом случае следует считать колебания водного потока, его долговременное постепенное ослабление, а также меандрирование. Это способствовало поставке и осадению более тонкодисперсного материала и смене фаций в неоген-четвертичное время. Наклонная слоистость отложений свидетельствует о формировании клиноформы, сползанию которой препятствовало промерзание толщи.

Следует полагать, что явление засоления отложений над кровлей мерзлых пород распространено для большинства термокарстовых лагун. В этом случае интерпретировать геохимические данные затруднительно, поскольку постепенное протаивание толщи приводило к миграции химических компонентов внутри нее, в том числе и органического вещества, связанного в основном с тонкопелитовой фракцией. Подобное явление вертикальной миграции описано для органического вещества почв [18]. Выявленные неоднород-

ности химического состава отложений и поровых вод свидетельствуют о ступенчатости процессов протаивания на разных пространственно-временных масштабах, что следует учитывать при оценке инженерных рисков.

Таяние подводной мерзлоты, часто сопровождаемое массивным выбросом газов в водную толщу и атмосферу, является одним из опасных природных процессов и представляет глобальный риск планетарного масштаба. Описанный в настоящей работе феномен значительного засоления надмерзлотной толщи акцентирует внимание на изучении термокарстовых процессов криолитозоны Восточно-Арктического шельфа. Опасность представляет также активация пула органического углерода, заключенного в мерзлоте, содержание которого оценивается в  $1.5 \times 10^{18}$  г С [17]. Мобилизация органического углерода мерзлых толщ и его вовлечение в биогеохимический цикл носит глобальный характер, что будет способствовать усилению газогенерации на шельфе и увеличению стока органического вещества в Северный Ледовитый океан [12]. Дальнейшие комплексные исследования арктического шельфа являются приоритетными и позволят более детально изучить проблемы, связанные с глобальными природными рисками.

Работа выполнена при тесном сотрудничестве научных коллективов Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Института химии ДВО РАН, Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова. Авторы благодарят заведующую лабораторией арктических исследований ТОИ ДВО РАН И.П. Семилетова за возможность участия в экспедиционных работах.

Финансовое сопровождение работы, связанной со сбором первичных геолого-геохимических данных, осуществлялось при поддержке Правительства РФ, грант № 14.Z50.31.0012. Часть работы, связанная с комплексным анализом и обработкой полученных данных, выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-50-00095).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арктика на пороге третьего тысячелетия / Под ред. Грамберга И.С., Лаверова Н.П. СПб.: Наука, 2000. 247 с.
2. Ветров А.А., Романкевич Е.А. Первичная продукция и потоки органического углерода на дно в арктических морях, ответ на современное потепление // Океанология. 2011. Т. 51. № 2. С. 266–277.
3. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В. и др. Геодинамическая модель развития арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–35.

4. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Шахова Н.Е. и др. О механизмах деградации подводных многолетне-мерзлых пород на восточном арктическом шельфе России // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 2. С. 185–188.
5. Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л. Обстановки морфолитоогенеза в прибрежной зоне Мирового океана. М.: Наука, 2007. 455 с.
6. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
7. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
8. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. РАН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
9. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Кассенс Х. и др. М.: МГУ, 2009. 608 с.
10. Слагода Е.А. Криолитоогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень: Экспресс, 2004. 119 с.
11. Sanchez-Garcia L., Vonk J.E., Charkin A.N. et al. Characterisation of three regimes of collapsing Arctic Ice Complex deposits on the SE Laptev Sea coast using biomarkers and dual carbon isotopes // Permafrost and Periglacial Processes. 2014. V. 25. P. 172–183.
12. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. 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. № 8. P. 2407–2426.
13. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // Nature Geoscience. 2014. V. 7. № 1. P. 64–70.
14. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf // J. of Geoph. Res. 2014. V. 115. C08007. P. 1–14.
15. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf // Science. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
16. Stein R., Macdonald R.W. (Eds.) The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004. 363 p.
17. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochemical Cycles. 2009. V. 23. GB2023. P. 1–11.
18. Trevenot M., Dignac M.-F., Rumpel C. Fate of lignins in soils: A review // Soil Biology & Biochemistry. 2010. V. 42. P. 1200–1211.
19. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Carbon cycle in the Russian Arctic Seas. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 331 p.
20. Vonk J.E., Semiletov I.P., Dudarev O.V. et al. Preferential burial of permafrost-derived organic carbon in Siberian-Arctic shelf waters // J. of Geoph. Res. 2014. V. 119 (12). P. 8410–8421.

## **Peculiarities of the Arctic Shelf Research: Experience from the Geological and Geochemical Integrated Study of the Laptev Sea**

**A. S. Ulyantsev, L. I. Lobkovsky, A. V. Zhavoronkov, E. A. Romankevich**

Based on results of integrated geological and geochemical research a considerable variation of shallow-water Laptev Sea shelf deposits composition was shown. An organic carbon content fluctuation reflects a predominantly thermoabrasion and riverine fluxes of organic matter. Over the permafrost boundary at lagoon a significant salinization of deposits was observed. This saline effect amplifies the permafrost thawing as well observed as coarsening of particles. Integrated Arctic shelf research program was proposed. This proposal includes techniques for sampling, sample preparation, samples analysis and interpretation of obtained data.