

Н. В. Либина, С. Л. Никифоров

Экзарационные явления на восточном арктическом шельфе России

Результаты экспедиционных геолого-геофизических исследований свидетельствуют о возможности активизации природных опасных явлений, которые связаны с ледовой экзарацией, таянием многолетнемерзлых пород, оползнями, термоабразией берегов и сейсмической активностью. Указанные процессы представляют геориски практически для всех видов деятельности, включая эксплуатацию Северного морского пути (СМП). Одним из наиболее опасных природных процессов является ледовая экзарация, в результате которой происходит вспахивание морского дна подводной частью ледяных образований. Экзарационные процессы способны создать аварийную ситуацию при строительстве и эксплуатации любых подводных инженерных сооружений. Натурные сейсмоакустические данные, полученные в пределах восточного арктического шельфа России, зафиксировали многочисленные борозды ледового выпахивания как в мелководной, так и в глубоководных частях шельфа. Современное высокоразрешающее сейсмоакустическое оборудование позволило получить детальные морфометрические характеристики зафиксированных борозд. Фактическая глубина и встречаемость следов воздействия ледовых образований на дно существенно превысили рассчитанную вероятность встречаемости по данным ледовой обстановки. Полученные результаты позволили классифицировать данные формы рельефа по происхождению на современные мелководные и древние (реликтовые) глубоководные. В позднечетвертичное время в период регрессии моря отсутствие покровного оледенения не исключало наличия мощных дрейфующих льдов, которые производили экзарацию дна в современной глубоководной части моря, а в дальнейшем следовали за трансгрессивным поднятием уровня моря. При этом, вероятно, происходило разрушение плотного обезвоженного глинистого слоя осадков, образованного в период регрессии. Затем во время неоднократных трансгрессивно-регрессивных колебаний уровня моря сформированные траншеи с отвалами грунта были заморожены и таким образом сохранились до наших дней. Прибрежные мелководные борозды являются результатом современного взаимодействия ледовых образований с морским дном, которые в условиях потепления климата активизируются и представляют настоящие природные риски по трассе СМП.

Ключевые слова: арктический шельф, природные риски, картирование рельефа дна, Северный морской путь, ледовая экзарация, профилограф, гидролокатор бокового обзора.

Введение

Каждое из арктических морей России имеет геолого-геоморфологические особенности, что связано с их формированием и развитием. Согласно структурному районированию арктический шельф России можно разделить на два крупных района: западный (Баренцево море и западная часть Карского моря) и восточно-арктический (восточная часть Карского моря, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря). В четвертичном периоде эти два района также имели различную историю развития. Так, западный Баренцево-Карский сегмент относился к гляциальному типу шельфа, а восточно-арктический – к перигляциальному, где покровное оледенение отсутствовало. На современном этапе природные обстановки арктических морей России также отличаются друг от друга. На западе природные риски по трассе СМП связаны преимущественно с усилением гидродинамического режима и оползневых явлений, а также с сейсмической активностью; в пределах восточного сегмента шельфа – геолого-геоморфологические природные риски иного происхождения, где главенствующими процессами являются деградация подводных многолетнемерзлых пород (ПММП) с вероятным изменением физических и биогеохимических свойств верхней осадочной толщи и изменение общей литодинамической обстановки. Ледовая экзарация на современном этапе не представляет собой исключение – в пределах Баренцева моря и приноземельской части Карского моря она связана преимущественно с айсбергами, которые образуются в результате разрушения ледников Новой Земли, архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, в то время как на востоке она обусловлена разрушением сезонных или многолетних ледовых полей. Под экзарацией понимается вспахивание морского дна подводной частью ледяных образований: торосов, стамух, айсбергов и т. п. [1]. Более детальное определение было предложено С. А. Огородовым: "...ледовое выпахивание или экзарация – деструктивное механическое воздействие льдов на грунт, связанное с динамикой ледяного покрова, торошением и стамухообразованием под влиянием гидрометеорологических факторов и рельефа прибрежно-шельфовой зоны" [2]. На рис. 1 показана схема выпахивания дна многокилевым торосом.

Экзарационные явления опасны и могут стать причиной аварийной ситуации при строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений на морском дне (например, объектов нефтегазового комплекса, подводных трубопроводов) в результате воздействия динамических и статических нагрузок. В пределах западного сектора российского шельфа Арктики (в отличие от восточного) в настоящее время проводится большой объем работ по изучению геологических природных рисков, в том числе

и экзарационных явлений, что в первую очередь связано с освоением газовых и нефтяных месторождений [3]. Для анализа состояния природной среды используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), аэрофотосъемок, инструментальных наблюдений, результаты авиационной ледовой разведки [4; 5]. Расширяется использование моделирования процессов торосообразования и вызываемого ими воздействия на дно [6; 7]. При этом обследование поверхности дна инструментальными методами выполняется в основном на участках предполагаемого строительства объектов нефтегазового комплекса и прокладки коммуникаций. Экзарационные природные явления в морях восточного сектора Арктики изучены недостаточно.

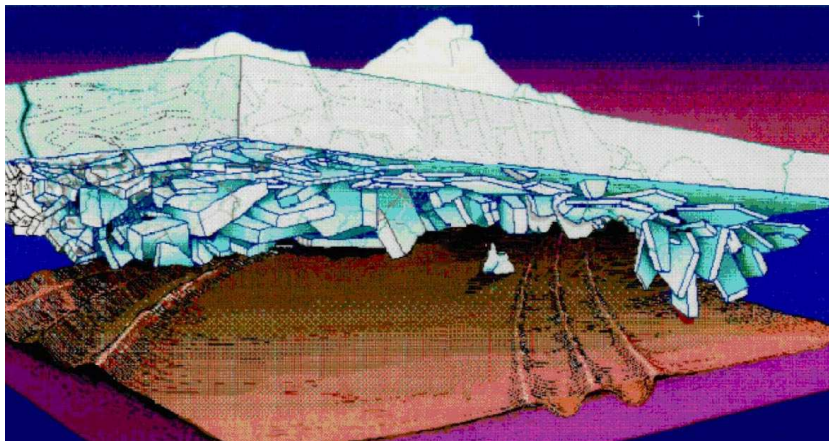


Рис. 1. Модель ледового выпахивания [8]

Fig. 1. Ice gouging in scheme [8]

Материалы и методы

Основные первичные натурные данные были получены во время экспедиционных исследований 57-го рейса НИС "Академик М. А. Лаврентьев" в восточном секторе арктического шельфа России, где одной из задач являлось картирование рельефа дна и изучение верхней осадочной толщи с помощью сейсмоакустического оборудования [9; 10]. Используемый аппаратный комплекс состоял из параметрического эхолот-профилографа SES-2000 и двухчастотного гидролокатора бокового обзора (ГБО) "Гидра" 250/500 (с возможным изменением частоты излучения – 250 или 500 кГц).

Работа параметрического акустического излучателя эхолот-профилографа основана на нелинейном эффекте взаимодействия акустических волн, излучаемых приемопередающей антенной в водной среде. При взаимодействии первичных мощных высокочастотных акустических волн накачки с частотами ω_1 и ω_2 и нелинейности водной среды, в которой распространяются акустические волны, происходит эффективное нарастание амплитуды волны на комбинационных частотах $\omega_{\pm} = n\omega_1 \pm m\omega_2$, где $n, m = 1, 2, 3, \dots$ – целые числа. Из всего набора комбинационных частот основной практический интерес представляют волны наименьшей разностной частоты $\omega = \omega_1 - \omega_2$, поскольку с уменьшением частоты коэффициент затухания звука уменьшается. Вследствие этого генерируемая результирующая акустическая низкочастотная волна ω может распространяться на большие расстояния. Применение параметрических антенн позволяет получить высокую разрешающую способность при значительном увеличении глубины проникновения сигнала в слой верхней осадочной толщи.

Антенна гидролокатора излучает и принимает отраженный от неровностей дна сигнал обратного рассеяния, фиксируя полосу обзора шириной в несколько глубин на каждый борт. Ширина полосы обзора зависит от многих факторов (гидрологических условий, рельефа дна, акустических свойств дна), при этом коэффициент рассеяния у различных типов грунтов и предметов будет различен, что визуально отображается на акустическом изображении посредством различной яркости точек.

Работы с указанным комплексом проводились при движении судна с синхронной записью регистрируемых данных ГБО и профилографа и параллельным выводом текущих изображений на экраны соответствующих мониторов. На экран монитора профилографа выводился сейсмоакустический разрез дна под судном, а на монитор компьютера управления комплексом ГБО – акустическое изображение поверхности дна по правому борту по ходу судна. ГБО позволял получить акустические данные о поверхности дна и идентифицировать форму донных объектов (в частности, экзарационных борозд). Параметрический профилограф отображал сейсмоакустический разрез приповерхностной (до первых десятков метров) структуры дна, профиль дна и в случае пересечения борозд точно по курсу позволял определять их реальные морфологические размеры. Особенностью нашей технологии при проведении натурных работ было размещение обеих антенн на специальном креплении штанги в ряд одна за другой по ходу движения.

Результаты и обсуждение

В море Лаптевых комплексные сейсмоакустические исследования проводились на двух полигонах. Один из них (северный, на глубинах от 50 до 100 м) располагался вблизи северной границы шельфа. Второй (южный) был расположен в мелководной части дельты реки Лена. Оба полигона показаны на карте моря Лаптевых красными прямоугольниками (рис. 2). Одновременная запись данных эхолота-профилографа и ГБО позволяла определять геометрические размеры и форму наблюдаемых донных объектов, оценивать изменчивость придонного слоя водной толщи, состояние и структуру поверхности дна, приповерхностной области дна.

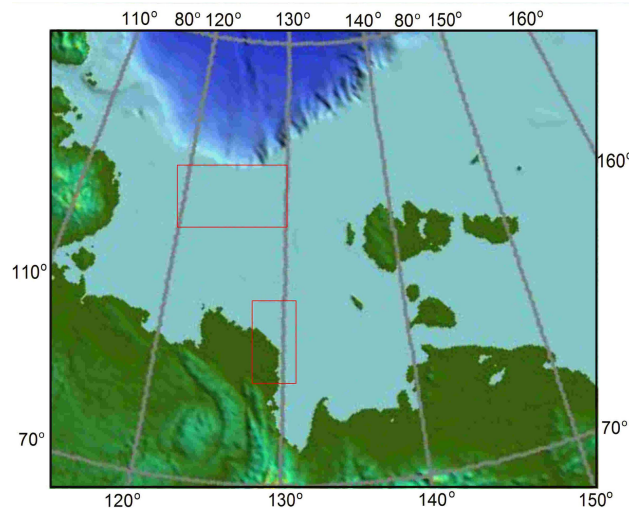


Рис. 2. Полигоны сейсмоакустических исследований
Fig. 2. The areas of seismoacoustic study

Экзарационные борозды обнаружены в широком диапазоне глубин – от прибрежного мелководья до бровки шельфа. Так, на рис. 3 приведены фрагменты экзарационных борозд на глубине 70,5 м с ярко выраженными отвалами грунта по бортам, что свидетельствует о внешнем механическом воздействии на дно [11].

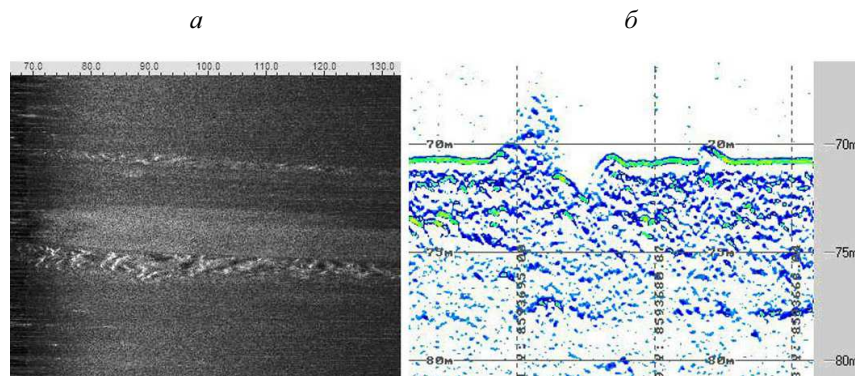


Рис. 3. Фрагменты записи борозды выпаживания на дне моря Лаптевых (глубина моря $H = 70,5$ м [11], ширина борозды 40 м с отвалами 176 м, глубина борозды 1,5 м): *a* – акустическое изображение дна по данным ГБО; *б* – сейсмоакустический разрез по данным эхолота-профилографа
Fig. 3. Ice gouging evidences within the Laptev Sea (the depth of the sea – 70.5 м [11], the width of gouging seabed elements – 40 м, its depth – 1.5 м): *a* – the side scan sonar data; *b* – the echo profiling data

Исходя из полученных данных, борозды ледового выпаживания на восточном арктическом шельфе можно разделить как минимум на две категории: прибрежные и глубоководные.

Экзарационные проявления в мелководной области

На мелководье наблюдались как одиночные борозды, так и серии (или группы), состоявшие из борозд различной протяженности и ширины. Наблюдались многочисленные следы последовательного наложения борозд друг на друга [9–11]. Направления борозд и их последующие пересечения разнообразны

(в результате влияния гидродинамических факторов). Например, угол подхода волн к береговой линии может определять простирание этих форм рельефа. На рис. 4 приведены фрагменты сейсмоакустических изображений с разнонаправленными следами (бороздами) ледового выпахивания: пересечение борозды более поздними следами движения других ледовых образований (рис. 4, б); вероятный отрыв стамухи от поверхности дна (рис. 4, в).

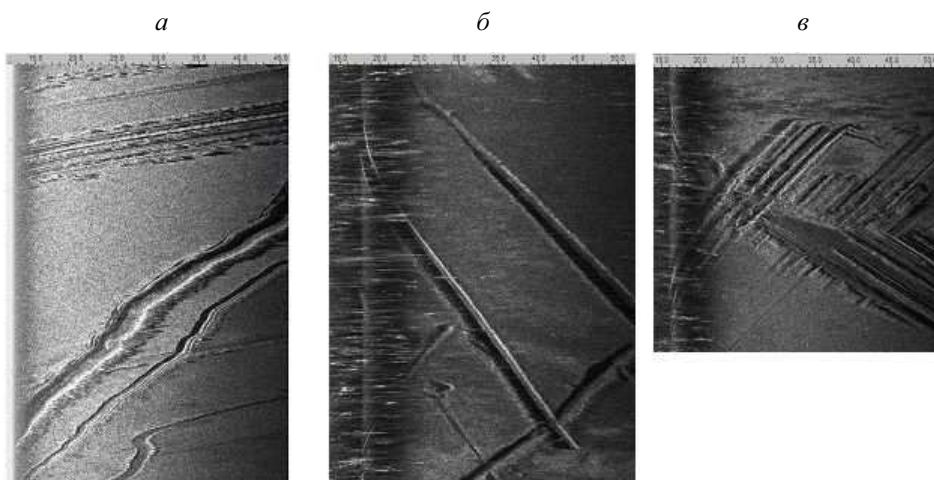


Рис. 4. Акустические изображения многочисленных экзарационных борозд на дне моря Лаптевых. Глубина моря H , м: а – 16,5; б – 20,5; в – 19,5 [11]

Fig. 4. Acoustic images of ice gouging effects in the Laptev Sea.

The depth of the sea H : а – 16.5 m; б – 20.5 m; в – 19.5 m [11]

На рис. 5 приводится совмещенное изображение дна, полученное с помощью ГБО ($f=500$ кГц) и эхолот-профилографа. Ширина морского дна, которая здесь подверглась экзарации, составляет более 200 м, а максимальная глубина выпахивания 0,7 м. Сейсмоакустический разрез (рис. 5, б) показывает профиль деформации дна в результате ледового выпахивания. Предположительно, след оставлен движением многокилевого ледяного образования [11].

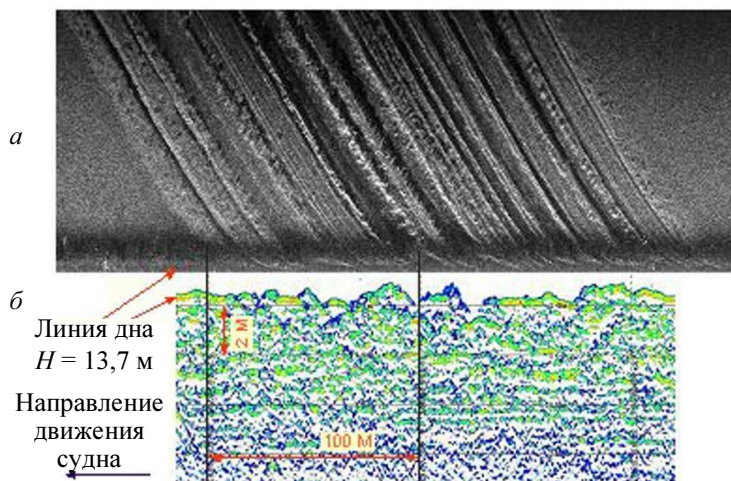


Рис. 5. Следы ледового выпахивания (глубина моря 13,7 м [11]): а – сейсмоакустический разрез (по данным профилографа); б – акустическое изображение (по данным ГБО)

Fig. 5. Ice gouging on the depth 13.7 m [11]: а – the side scan sonar data; б – the echo profiling data

Результаты гидролокационной съемки свидетельствуют о современном интенсивном воздействии морских льдов на поверхность дна (многочисленные борозды, царапины, валы, углубления). Многие из этих образований имеют сложную форму, что связано с выпахиванием дна "многокилевыми" ледовыми образованиями. Имеющееся разнообразие борозд обусловлено тем, что одни и те же участки дна подвергались многократным воздействиям различных по размерам ледовых образований, которые перемещались под разными углами к береговой линии. Причинами изменений движения могут являться волнение, ветровой дрейф, приливные, сгонно-нагонные явления, а также их сочетание.

Экзарационные проявления в глубоководной области

Экзарационные борозды также обнаружены на больших глубинах (более 40 м) и почти до бровки шельфа. Фрагмент гидролокационной записи протяженностью 2,71 км, полученный в Восточно-Сибирском море (глубина моря $H = 50$ м), приведен на рис. 6. Из записи следует, что встречаются как одиночные, так и сгруппированные борозды различного направления, в том числе и пересекающиеся.

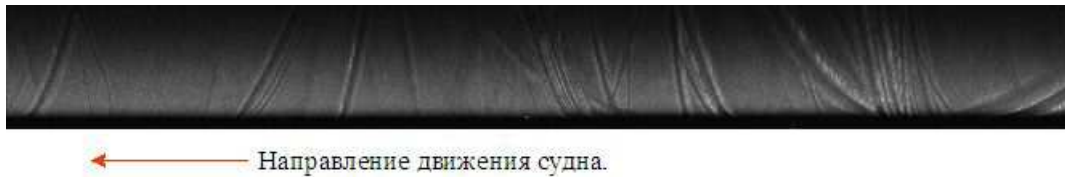


Рис. 6. Фрагмент гидролокационной записи протяженностью 2,71 км ($H = 50$ м) [11]
 Fig. 6. Elements of the side scan sonar data along the total route 2.71 km ($H = 50$ м) [11]

На приведенном участке общая встречаемость борозд составляла примерно 9–10 на 1 км. Аналогичная встречаемость борозд выпахивания наблюдалась вдоль всего галса промера, что свидетельствует о высокой пространственной плотности экзарационного выпахивания дна на глубине 50 м. Можно сделать предположение, что различно и время их возникновения. Об этом свидетельствуют характер пересечений и различная степень размытости бортов.

В море Лаптевых на глубинах более 60 м в основном зарегистрированы одиночные борозды. Их ширина и глубина выпахивания существенно больше, чем у борозд на мелководном участке. Фрагменты некоторых характерных борозд, а также их основные параметры (глубина моря, ширина с отвалами и бортами, глубина борозды) [11] представлены на рис. 7, а–д. В правом нижнем углу сейсмоакустических разрезов изображены планы пространственного расположения борозд. Стрелка показывает направление движения судна, толстая линия – пространственное расположение борозды.

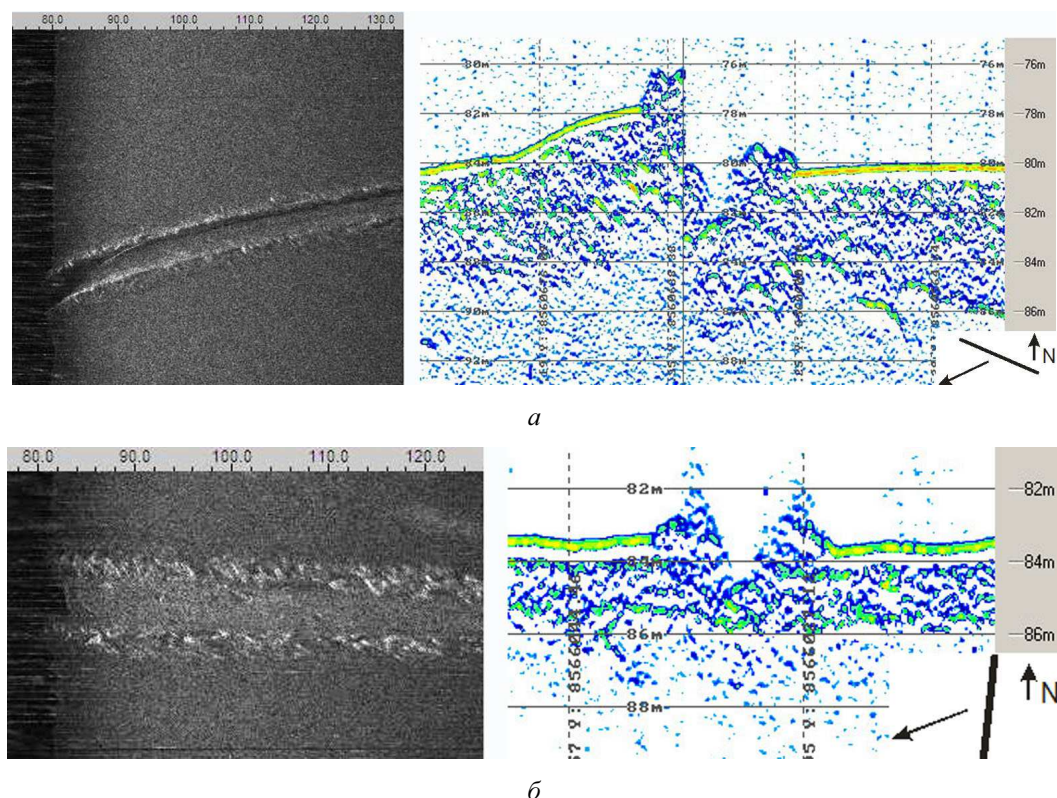


Рис. 7. Фрагменты записи глубоководных борозд на дне моря Лаптевых (слева – акустическое изображение дна, справа – сейсмоакустический разрез) [11]:
 а – $H = 80$ м, борозда шириной 46 м (с отвалами 213 м), глубиной 1,8 м (от линии дна);
 б – $H = 83,6$ м, борозда шириной 22 м (с отвалами 78 м), глубиной 1,5 м

Fig. 7. Elements of the side scan sonar data fixed in the Laptev Sea (left – side scan sonar data, right – echo sounding profiling) [11]:
 а – the depth of the sea 80 m, the width of gouging 46 m, its depth 1.8 m;
 б – the depth of the sea 83.6 m, the width of gouging 22 m, its depth 1.5 m

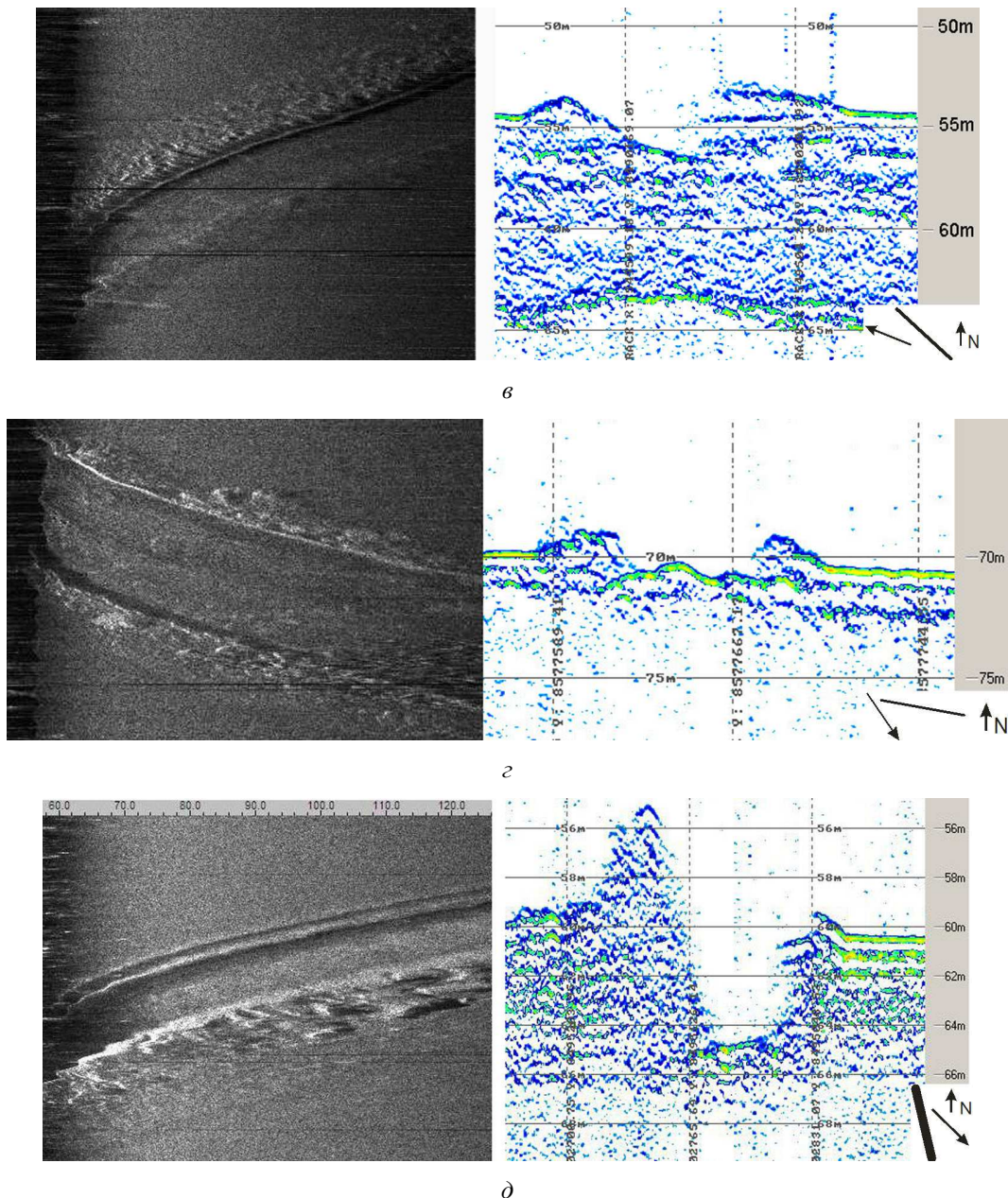


Рис. 7. Фрагменты записи глубоководных борозд на дне моря Лаптевых (слева – акустическое изображение дна, справа – сейсмоакустический разрез) [11]:

- β – $H = 54,5$ м, борозда шириной 44 м (с отвалами 185 м), глубиной 2 м;
- ζ – $H = 70$ м, борозда шириной 64 м (с отвалами 161 м), глубиной 0,8 м;
- δ – $H = 60$ м, борозда шириной 100 м (с отвалами 270 м), глубиной 4,5 м

Fig. 7. Elements of the side scan sonar data fixed in the Laptev Sea (left – side scan sonar data, right – echo sounding profiling) [11]: β – the depth of the sea 54.5 m, the width of gouging 44 m, its depth 2 m; ζ – the depth of the sea 70 m, the width of gouging 64 m, its depth 0.8 m; δ – the depth of the sea 60 m, the width of gouging 100 m, its depth 4.5 m

Как видно на рис. 7, профили вспахивания дна имеют разную форму отвалов (валов) и донной части, различна также и крутизна бортов. Глубина зарегистрированных борозд лежит в диапазоне 0,3–4,5 м (рис. 7, δ), ширина составляет десятки и сотни метров. Максимальная глубина моря, на которой зарегистрированы борозды, равна 90 м (на глубинах более 90 м промеры практически не выполнялись). Большинство глубоководных борозд одиночные, но встречались и отдельные пары параллельных борозд (рис. 8).

Сложно представить, что данные формы рельефа дна на столь больших глубинах могли быть образованы современными льдами. В этой акватории льдов таких размеров нет.

Сравнение наших данных с имеющимися расчетными оценками вероятности встречаемости стамух в зависимости от глубины показали, что фактическая встречаемость следов выпахивания дна существенно выше, чем могла быть по результатам прогнозных оценок.

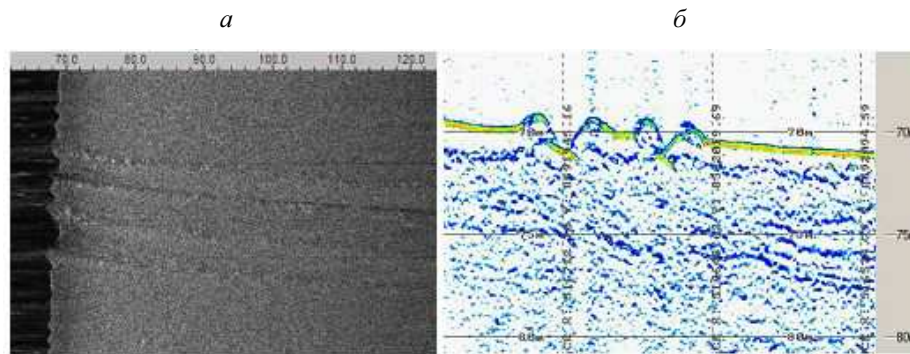


Рис. 8. Параллельные борозды на глубине 70 м (*a* – акустическое изображение дна, *б* – сейсмоакустический разрез) [11]. Ширина левой борозды равна 20 м (с отвалами 64 м), глубина 1 м; ширина правой борозды – 15 м (с отвалами 49 м), глубина 0,6 м
Fig. 8. Gouging traces at the depth of the sea 70 m (*a* – side scan sonar data, *б* – echo sounding profiling) [11]: the width of the left 20 m, with the width 64 m, its depth 1 m; the width of the right one 15 m, with the width 49 m, its depth 0.6 m

На основе результатов статистической обработки материалов ледовой авиационной разведки, полученных в 1962–1993 гг., и данных ДЗЗ были определены оценки геометрических параметров торосистых образований и стамух, пространственные и временные изменения их количества, частота встречаемости [12]. По распространенности стамух в море Лаптевых (в зависимости от глубины моря) приводятся следующие данные: минимальная осадка 0,5 м, средняя – 11,59 м, максимальная – 37,2 м. Преимущественное число стамух (60 % от общего количества) наблюдается на глубинах моря 8–16 м. Далее с увеличением глубины моря количество стамух быстро уменьшается и на глубинах от 24 м и более не превышает 1 %. При этом отмечается, что представленные вероятностные оценки выполнены по нерегулярным данным ледовых разведок (как по времени, так и в пространстве). Выявленные нами на южном "мелководном" полигоне борозды зафиксированы на глубинах 9–24 м; следует отметить, что на глубинах 15–24 м встречаемость многочисленных борозд была сопоставима с встречаемостью борозд на меньших глубинах. Высокая интенсивность фактического вспахивания дна ледовыми образованиями на глубинах около 25 м существенно превышает рассчитанную вероятность возможного выпахивания дна по данным ледовой обстановки [11].

На глубинах более 20 м влияние гидродинамических процессов, вызывающих размывание борозд, слабее, чем на меньших глубинах. Следовательно, наблюдаемые борозды выпахивания могут сохраняться без особых изменений длительное время. Аналогичная ситуация отмечалась и в других морях. В частности, исследования дна Байдарацкой губы [13] показали более редкую встречаемость следов ледового выпахивания на глубинах менее 15 м, чем на больших глубинах. Это вызвано сглаживанием дна приливными течениями и волнами при малых глубинах. Проведенные в море Лаптевых последующие исследования с тем же комплектом оборудования позволили сопоставить изображения борозд выпахивания, полученные в экспедициях 2011 и 2012 гг. на одних и тех же галсах. Сравнения показали, что наряду с появлением за год новых борозд многие достаточно сильно, а часть практически полностью замыты [14].

Сокращение площади арктических льдов отмечается (по данным ДЗЗ [15]) с конца 1970-х гг. Уменьшение массы ледникового покрова, толщины морского льда, количества дрейфующих льдов может сопровождаться активизацией формирования торосов [6], что объясняет высокую встречаемость экзарационных прибрежных проявлений в настоящее время в море Лаптевых. Как правило, отношение глубины киля тороса к высоте его паруса составляет по различным данным 2,75–4,4 м в зависимости от типа льда тороса, линейных размеров отдельных торосов и гряд, вида торосообразования, протяженности и формы киля [16; 6; 7]. Для расчета вероятности встречаемости, плотности распределения, глубины возможной осадки торосистых образований и их воздействия на дно используют ряд различных алгоритмов, однако применение акустических методов измерения показывает фактический и соответственно более точный результат. Так, на представленных в работе [17] сейсмоакустических профилях, выполненных севернее дельты реки Лена на глубине 30–35 м, на дне выделяются многочисленные экзарационные борозды, а также погребенные борозды на глубине около 5 м. Борозды встречаются и на больших глубинах (50–90 м), и их образование никак не может быть связано с современным ледовым выпахиванием. При отношении

размеров кия к парусу тороса 3 : 4 принципиально возможно ледовое выпаживание на глубинах до 60 м. При этом величина размера паруса тороса должна быть как минимум 15 м, а такие торосы практически не встречаются, еще реже появляются торосы с величиной паруса 20 м [16; 12].

Образование глубоководных борозд выпаживания, вероятно, связано с палеогеографическими причинами – регрессией моря в позднем плейстоцене почти до бровки шельфа. В результате периодического осушения и затопления шельфа была сформирована слоистая структура верхней осадочной толщи, причем в регрессивные циклы (эпохи похолоданий) происходило интенсивное вымораживание исходной поверхности и формирование плотных обезвоженных горизонтов (как, например, в период последней позднечетвертичной регрессии моря). В трансгрессивные циклы (эпохи потепления) накапливались относительно рыхлые морские отложения, при этом устойчивая отрицательная температура придонной воды способствовала консервации данной слоистой структуры. Отсутствие покровного оледенения не исключало наличия мощных дрейфующих льдов, которые производили экзарацию дна в современной глубоководной части моря, а в дальнейшем следовали за трансгрессивным поднятием уровня моря. При этом, предположительно, происходило разрушение плотного обезвоженного глинистого слоя осадков, образованного в период регрессии. Далее, во время неоднократных трансгрессивно-регрессивных колебаний уровня моря, сформированные траншеи с отвалами грунта были заморожены и таким образом сохранились до наших дней [18].

В западном секторе Арктики в ходе различных экспедиций наблюдались глубоководные борозды (и наложения борозд друг на друга). Так, в Баренцевом море борозды фиксировались на глубинах 300 м и глубже [19; 20 и др.].

Заключение

Комплексные исследования акустическими методами (ГБО и профилирование) позволили получить детальные данные о параметрах борозд ледового выпаживания на отдельных полигонах моря Лаптевых. Фактически встречаемость выпаживания дна ледовыми образованиями оказалась выше прогнозируемой по данным ледовой разведки и ледовой обстановки. Зафиксированные борозды можно разделить как минимум на две категории: современные мелководные прибрежные и древние (реликтовые) глубоководные.

Во время регрессии моря в позднечетвертичный период отсутствие покровного оледенения не исключало наличия мощных дрейфующих льдов, которые производили выпаживание дна в современной глубоководной части моря, а в дальнейшем следовали за трансгрессивным поднятием уровня моря. Позднее, во время повторяющихся трансгрессивно-регрессивных циклов изменения уровня моря, сформированные борозды выпаживания были заморожены и сохранились до настоящего времени. Прибрежные мелководные борозды являются результатом современного взаимодействия ледовых образований с морским дном, которые в условиях потепления климата могут активизироваться и представлять нарастающие природные риски по трассе СМП.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0005).

Библиографический список

1. Бородачев В. Е., Гаврило В. П., Казанский М. М. Словарь морских ледовых терминов. СПб. : Гидрометеоздат, 1994. 127 с.
2. Огородов С. А. Морфодинамическое районирование береговой зоны Печорского моря // Геоморфология. 2003. № 1. С. 73–79.
3. Вершинин С. А., Трусков П. А., Лиферов П. А. Воздействие ледовых образований на подводные объекты. М. : Русская книга, 2007. 196 с.
4. Горбунов Ю. А., Лосев С. М. Пространственная и временная изменчивость распространения стамух // Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей / под ред. А. И. Данилова, Е. У. Миронова, В. А. Спичкина. СПб. : ААНИИ, 2004. С. 351–358.
5. Горбунов Ю. А. Стамухи в юго-восточной части моря Лаптевых // ПОЛЭКС-Север-76 : науч. результаты : [сб. статей : в 2 ч.]. Ч. 2. Л. : Гидрометеоздат, 1979. С. 107–110.
6. Миронов Е. У., Порубаев В. С. Статистическая модель морфометрии гряды тороса в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 3 (89). С. 49–61.
7. Куликов С. Н. Интерпретация данных гидролокации бокового обзора на мелководье Баренцева и Карского морей. URL: <http://www.forskningsradet.no>.
8. Марченко А. В. Модели торошения морских льдов // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 3. С. 67–129.
9. Дмитриевский Н. Н., Ананьев Р. А., Либина Н. В., Росляков А. Г. Использование сейсмоакустического комплекса для исследований верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в восточной Арктике // Океанология. 2013. Т. 53, № 3. С. 412–417.

10. Дмитриевский Н. Н., Ананьев Р. А., Либина Н. В., Росляков А. Г. Сейсмоакустические исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в морях восточной Арктики в 57-м рейсе научно-исследовательского судна "Академик М. А. Лаврентьев" // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 4. С. 617–620.
11. Либина Н. В. Аппаратурный комплекс контроля изменчивости гидрофизических полей и петрофизических параметров придонной среды морских акваторий : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.28 М., 2012. 148 с.
12. Горбунов Ю. А., Лосев С. М., Дымент Л. Н. Стамухи моря Лаптевых // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008. № 2 (79). С. 111–116.
13. Камалов А. М., Огородов С. А., Бирюков В. Ю., Совершаева Г. Д., Цвезинский А. С. [и др.]. Морфолитодинамика берегов и дна Байдарацкой губы на трассе перехода магистральными газопроводами // *Криосфера Земли*. 2006. Т. X, № 3. С. 3–14.
14. Дмитриевский Н. Н., Ананьев Р. А., Мелузов А. А., Мутовкин А. Д., Росляков А. Г. Геолого-акустические исследования в море Лаптевых в рейсе судна "Владимир Буйницкий" // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 1. С. 128–132.
15. Serreze M., Walsh J., Chapin F. et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Climatic Change*. 2000. V. 46, Iss. 1–2. P. 159–207.
16. Зубов Н. Н. Льды Арктики. М. : Изд-во Главсевморпути, 1945. 360 с.
17. Рекант П. В., Тумской В. Е., Гусев Е. А., Швенк Т., Шписс Ф. [и др.]. Распространение и особенности залегания субаквальной криолитозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики = System of the Laptev Sea and the adjacent Arctic Seas : современное состояние и история развития : монография / [Й. Тиде и др.] ; отв. ред. Х. Кассенс [и др.]. М. : Изд-во Московского университета, 2009. С. 332–348.
18. Лобковский Л. И., Никифоров С. Л., Шахова Н. Е., Семилетов И. П., Либина Н. В. [и др.]. О механизмах деградации подводных многолетнемерзлых пород на восточном арктическом шельфе России // *Доклады академии наук*. 2013. Т. 449, № 2. С. 185–188.
19. Зайончек А. В., Брекке Х., Соколов С. Ю., Мазарович А. О., Добролюбова К. О. [и др.]. Строение зоны перехода континент – океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24–26 рейсов НИС "Академик Николай Страхов", 2006–2009 гг.) // Строение и история развития литосферы = Structure and evolution of the lithosphere / гл. ред. Ю. Г. Леонов. М. ; СПб. : Paulsen, 2010. С. 111–157.
20. Rebesco M., Liu Y., Camerlenghi A., Winsborrow M., Laberg J. S. [et al.]. Deglaciation of the western margin of the Barents Sea ice sheet – A swath bathymetric and sub-bottom seismic study from the Kveithola Trough // *Marine Geology*. 2011. V. 279, Iss. 1–4. P. 141–147.

References

1. Borodachev V. E., Gavrilov V. P., Kazanskiy M. M. Slovar morskikh ledovykh terminov [Dictionary of sea ice terms]. SPb. : Gidrometeoizdat, 1994. 127 p.
2. Ogorodov S. A. Morfodinamicheskoe rayonirovanie beregovoy zony Pechorskogo morya [Morphodynamic division of the Pechora Sea coastal zone] // *Geomorfologiya*. 2003. N 1. P. 73–79.
3. Vershinin S. A., Truskov P. A., Liferov P. A. Vozdeystvie ledovykh obrazovaniy na podvodnye ob'ekty [Impact of ice formations on underwater objects]. М. : Russkaya kniga, 2007. 196 p.
4. Gorbunov Yu. A., Losev S. M. Prostranstvennaya i vremennaya izmenchivost rasprostraneniya stamuh [Space and temporary variability of the grounded hummocks distribution] // *Izmenchivost prirodnykh usloviy v shelfovoy zone Barentseva i Karskogo morey / pod red. A. I. Danilova, E. U. Mironova, V. A. Spichkina*. SPb. : AANII, 2004. P. 351–358.
5. Gorbunov Yu. A. Stamuhi v yugo-vostochnoy chasti morya Laptevyyh [Stamukhi in the southeastern part of the Laptev Sea] // *POLEKS-Sever-76 : nauch. rezultaty : [sb. statey : v 2 ch.]*. Ch. 2. L. : Gidrometeoizdat, 1979. P. 107–110.
6. Mironov E. U., Porubaev V. S. Statisticheskaya model morfometrii gryady torosa v yugo-zapadnoy chasti Karskogo morya [Statistical model of a hummock ridge morphometry in the southwestern part of the Kara Sea] // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2011. N 3 (89). P. 49–61.
7. Kulikov S. N. Interpretatsiya dannykh gidrolokatsii bokovogo obzora na melkovode Barentseva i Karskogo morey [Interpretation of sonar data of the side review in shallow waters of the Barents and Kara Seas]. URL: <http://www.forskningradet.no>.
8. Marchenko A. V. Modeli torosheniya morskikh ldov [Tending models of the sea ice] // *Uspehi mehaniki*. 2002. V. 1, N 3. P. 67–129.
9. Dmitrevskiy N. N., Ananev R. A., Libina N. V., Roslyakov A. G. Ispolzovanie seysmoakusticheskogo kompleksa dlya issledovaniy verkhney osadochnoy tolschi i relefa morskogo dna v vostochnoy Arktike [The use of a seismoacoustic complex for research of the top sedimentary thickness and relief of the seabed in the East Arctic] // *Okeanologiya*. 2013. V. 53, N 3. P. 412–417.

10. Dmitrevskiy N. N., Ananov R. A., Libina N. V., Roslyakov A. G. Seismoakusticheskie issledovaniya verkhney osadochnoy tolschi i relefa morskogo dna v moryah vostochnoy Arktiki v 57-m reyse nauchno-issledovatel'skogo sudna "Akademik M. A. Lavrentev" [Seismoacoustic research of the top sedimentary thickness and relief of the seabed in the East Arctic seas during the 57th trip of the research vessel "Academician M.A. Lavrentyev"] // *Okeanologiya*. 2012. V. 52, N 4. P. 617–620.

11. Libina N. V. Apparaturnyi kompleks kontrolya izmenchivosti gidrofizicheskikh poley i petrofizicheskikh parametrov pridonnoy sredy morskikh akvatoriy [Instrumental complex for monitoring the variability of hydrophysical fields and petrophysical parameters of marine waters near-bottom environment] : dis. ... kand. tehn. nauk. M., 2012. 148 p.

12. Gorbunov Yu. A., Losev S. M., Dyiment L. N. Stamuhi morya Laptevyyh [Stamukhi of the Laptev Sea] // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2008. N 2 (79). P. 111–116.

13. Kamalov A. M., Ogorodov S. A., Biryukov V. Yu., Sovershaeva G. D., Tsvetsinskiy A. S. [i dr.]. Morfolitodinamika beregov i dna Baydaratskoy guby na trasse perehoda magistralnymi gazoprovodami [Morpholitic dynamics of the Baydaratskaya Bay coast and bottom on the transit route of the main gas pipelines] // *Kriosfera Zemli*. 2006. V. X, N 3. P. 3–14.

14. Dmitrevskiy N. N., Ananov R. A., Meluzov A. A., Mutovkin A. D., Roslyakov A. G. Geologo-akusticheskie issledovaniya v more Laptevyyh v reyse sudna "Vladimir Buynitskiy" [Geological and acoustic research in the Laptev Sea during the trip of the vessel "Vladimir Buynitskiy"] // *Okeanologiya*. 2014. V. 54, N 1. P. 128–132.

15. Serreze M., Walsh J., Chapin F. et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Climatic Change*. 2000. V. 46, Iss. 1–2. P. 159–207.

16. Zubov N. N. *Ldy Arktiki* [Arctic ices]. M. : Izd-vo Glavsevmorputi, 1945. 360 p.

17. Rekant P. V., Tumskoy V. E., Gusev E. A., Shvenk T., Shpiss F. [i dr.]. Rasprostranenie i osobennosti zaleganiya subakvalnoy kriolitozony v rayone banok Semenovskaya i Vasilevskaya (more Laptevyyh) po dannym seismoakusticheskogo profilirovaniya [Distribution and features of bedding of a subaquatic cryolitic zone around Semenovskaya and Vasilevskaya banks (the Laptev Sea) according to the seismoacoustic profiling] // *Sistema morya Laptevyyh i prilegayuschih morey Arktiki = System of the Laptev Sea and the adjacent Arctic Seas : sovremennoe sostoyanie i istoriya razvitiya : monografiya* / [Y. Tide i dr.]; otv. red. H. Kassens [i dr.]. M. : Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2009. P. 332–348.

18. Lobkovskiy L. I., Nikiforov S. L., Shahova N. E., Semiletov I. P., Libina N. V. [i dr.]. O mekhanizmah degradatsii podvodnykh mnogoletnemerzlykh porod na vostochnom arkticheskom shelfe Rossii [Regarding the mechanisms of degradation of underwater permafrost solids on the East Arctic shelf of Russia] // *Doklady akademii nauk*. 2013. V. 449, N 2. P. 185–188.

19. Zayonchek A. V., Brekke H., Sokolov S. Yu., Mazarovich A. O., Dobrolyubova K. O. [i dr.]. Stroenie zony perehoda kontinent – okean severo-zapadnogo obramleniya Barentseva morya (po dannym 24–26 reysov NIS "Akademik Nikolay Strahov", 2006–2009 gg.) [The structure of the transition continent – ocean zone of the Barents Sea northwestern frame (according to 24–26 navigations of research vessel "Academician Nikolay Strakhov", 2006–2009)] // *Stroenie i istoriya razvitiya litosfery = Structure and evolution of the lithosphere* / gl. red. Yu. G. Leonov. M. : SPb. : Paulsen, 2010. P. 111–157.

20. Rebesco M., Liu Y., Camerlenghi A., Winsborrow M., Laberg J. S. [et al.]. Deglaciation of the western margin of the Barents Sea ice sheet – A swath bathymetric and sub-bottom seismic study from the Kveithola Trough // *Marine Geology*. 2011. V. 279, Iss. 1–4. P. 141–147.

Сведения об авторах

Либина Наталия Викторовна – Нахимовский проспект, 36, г. Москва, Россия, 117997; Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: inatvit@mail.ru

Libina N. V. – 36, Nakhimovsky Avenue, Moscow, Russia, 117997; P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher; e-mail: inatvit@mail.ru

Никифоров Сергей Львович – Нахимовский проспект, 36, г. Москва, Россия, 117997; Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, д-р геогр. наук, гл. науч. сотрудник; e-mail: nikiforov@ocean.ru

Nikiforov S. L. – 36, Nakhimovsky Avenue, Moscow, Russia, 117997; P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Dr of Geogr. Sci., Leading Researcher; e-mail: nikiforov@ocean.ru

N. V. Libina, S. L. Nikiforov

Ice gouging effects on the eastern Arctic shelf of Russia

Results of the latest geological and geophysical marine cruises indicate activating of natural risks (or hazards) processes connected with ice gouging, permafrost melting, landslides, coastal thermoerosion and seismic activity. These processes represent great risks for all human marine activities including exploitation of the Northern Sea Route (NSR). One of the most dangerous natural processes is ice gouging, which results in the ploughing of the seabed by an underwater part of ice bodies. Ice gouging processes can create some emergency situation in the construction and operation of any underwater engineering structures. Natural seismoacoustic data obtained within the eastern Arctic shelf of Russia have recorded numerous ice gouging trails both in the coastal shallow and deep parts of the shelf as well. Modern high-resolution seismic devices have allowed receive detailed morphology parameters of underwater ice traces. The actual depth and occurrence of traces of the effect of ice formations on the bottom significantly exceed the calculated probability of occurrence according to ice conditions. Seismic data have allowed classify all these traces and subdivide them on modern coastal and ancient (or relict) deep ones. During Late Quaternary sea level down lifting the absence of cover glaciation did not exclude the presence of powerful drifting ice that produced ice gouging processes in the present deep part of the sea. Afterwards during sea level up lifting ice gouging follows to the sea level changes. In this case there could be destructed some dense clay dewatered sediment layer formed during the regression period. Further, during the repeated transgressive-regressive sea level fluctuations the generated ice traces could be frozen and thus preserved until our days. Modern coastal ice traces into marine shallow are the result of nowadays interaction of drifting ice and seabed that in conditions of global climate warming are activated and represent natural risks along the NSR.

Key words: Arctic coastal zone, natural hazards, mapping of seabed, Northern Sea Route, ice gouging, echo sounding, side scan sonar.