

УДК 551.4.038:551.467(985)

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭКЗАРАЦИИ ДНА ЛЕДЯНЫМИ ТОРОСИСТЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ

© 2018 г. С. А. Огородов^{1,*}, В. В. Архипов^{1, 2}, А. В. Баранская¹,
О. В. Кокин¹, А. О. Романов¹

Представлено академиком РАН Н.С. Касимовым 15.09.2015 г.

Поступило 15.09.2015 г.

Приведены некоторые результаты повторных геофизических съемок ледово-экзарационного микро-рельефа дна на трассе подводного перехода магистрального газопровода через Байдарацкую губу Карского моря. На основе результатов мониторинга, а также анализа литературных источников и моделирования установлено, что в условиях потепления климата и снижения ледовитости зона наиболее интенсивного ледово-экзарационного воздействия смещается в сторону суши, на более мелководные участки.

DOI: 10.7868/S0869565218040217

Морские льды как зональный фактор являются важным пассивным и активным рельефообразующим агентом в прибрежно-шельфовой зоне арктических и других замерзающих морей [15, 11, 12, 8, 9, 1]. Пассивное воздействие морских льдов на динамику берегов и дна замерзающих морей выражается в защитной роли припая и дрейфующих льдов от воздействия волн и приливов. Блокируя береговую зону в течение большей части года, морской лед регулирует действие активных гидродинамических факторов, сокращая время их проявления и определяя тем самым интенсивность абразии берегов и дна. Прямое или активное воздействие морских льдов проявляется в процессе ледовой экзарации (выпахивании) берегов и дна, транспорте наносов морскими льдами, формировании мёрзлых пород в контактной зоне лед–дно, явлениях локального размыва дна вокруг стамух и под приливными трещинами.

Среди перечисленных выше прямых ледовых воздействий наиболее опасным применительно к подводным трубопроводам, кабелям связи и прочим гидротехническим сооружениям на дне является экзарация (рис. 1) – деструктивное механическое воздействие льдов на грунт, связанное с динамикой ледяного покрова, торошением и стамухообразованием под влиянием

гидрометеорологических факторов и рельефа прибрежно-шельфовой зоны [9].

Недооценка величин экзарации дна может привести к повреждению инженерных сооружений, в то же время излишнее заглубление объектов сильно удорожает их строительство. Найти оптимальный вариант и тем самым снизить риски возникновения чрезвычайных ситуаций – в настоящее время наиболее актуальная задача науки и практики. Задача эта усложняется тем фактом, что нефтегазовое освоение прибрежно-шельфовой зоны замерзающих морей в настоящее время ведётся в условиях глобальных климатических изменений.

В Российской Федерации ледово-экзарационные процессы изучены на Приамальском шельфе [10], шельфе Сахалина [3], а также на Северном Каспии [2]. Наиболее детальные исследования проведены вдоль трассы перехода магистральным газопроводом “Бованенково–Ухта” Байдарацкой губы Карского моря [14], где впервые удалось исследовать влияние изменений климата на развитие ледово-экзарационного процесса.

Интенсивность экзарации дна ледяными образованиями (при неизменных литолого-геоморфологических условиях) в значительной степени определяется изменчивостью состояния, площади и мощности ледяного покрова. Последние характеристики могут быть получены на основе данных гидрометеорологических станций и анализа спутниковых изображений [7] с последующим сопоставлением с результатами съемок ледово-экзарационного микро-рельефа разных лет.

¹Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

²Государственный океанографический институт
им. Н.Н. Зубова, Москва

*E-mail: S.ogorodov@mail.ru

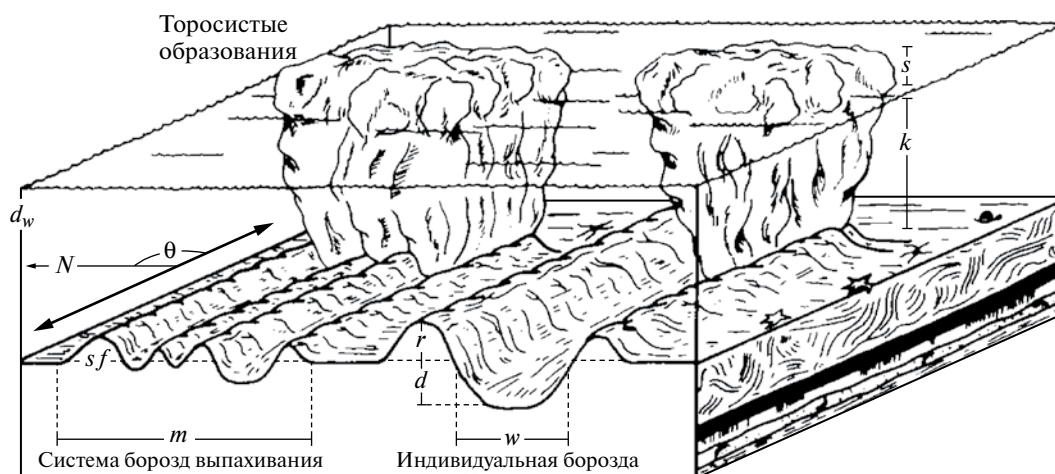


Рис. 1. Схема формирования систем параллельных борозд выпаживания “многокилевыми” и единичных борозд “однокилевыми” торосистыми образованиями [13]: k — глубина моря; s — высота тороса (над уровнем моря); d — глубина борозды; w — ширина борозды; r — высота бортика обваловки; m — ширина системы борозд; sf — ширина бортика; θ — ориентировка борозды.

В результате потепления климата осенью 2007 г. и осенью 2012 г. в Северном полушарии достигнут исторический минимум с начала спутниковых наблюдений в 1979 г. площади морских льдов. Изменяется и граница распространения припая. При прочих равных условиях чем больше сумма отрицательных температур, тем устойчивее и шире припай. Так, только за последнее десятилетие площадь припая в Арктике в период его максимального развития сократилась на 15% [7]. Продолжительность безлёдного периода, в свою очередь, увеличилась (рис. 2).

В условиях потепления климата существенно меняются характер и интенсивность экзарационного воздействия ледяных образований на дно и берега. В результате снижения продолжительности ледового

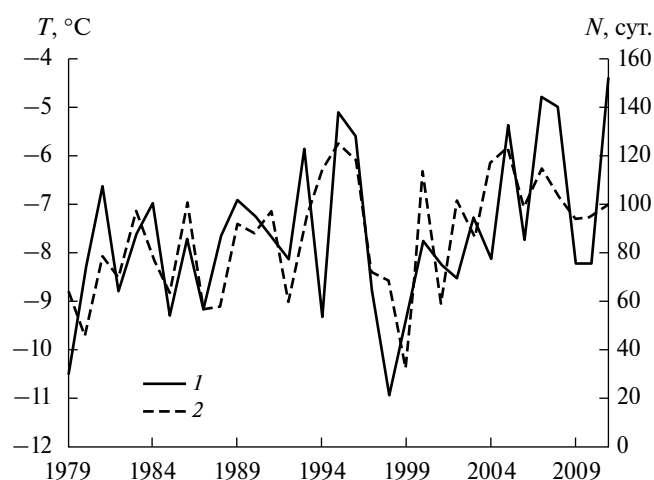


Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха (1) и продолжительность безлёдного периода (2) (по данным ГМС Маррессаля).

сезона и толщины ледяного покрова активизируется динамика льда, увеличивается его торосистость. В результате на фоне сокращения ширины и устойчивости припая усиливается воздействие морских льдов на берега. Параллельно активизируется динамика ледников: увеличивается сброс айсбергов, повышается вероятность выпаживания ими дна на глубоководных участках, встречи с судами и танкерами.

В последние десятилетия на фоне потепления климата в арктическом бассейне отмечается не только снижение ледовитости в целом, но и перестройка системы циркуляции морских вод и льдов, что приводит к перераспределению областей распространения тонких молодых и мощных многолетних паковых льдов.

Среди однолетних льдов в последнее десятилетие наблюдаются чётко выраженные аномалии мощности ледяного покрова (табл. 1). Уменьшение толщины льда не может не сказываться на размере ледяных торосистых образований, осадка которых находится в прямой зависимости от толщины льда. Имеется чёткая непосредственная связь между этими показателями. Из литературных источников известно, что при толщине льда 0,5–0,7 м в Каспийском море стамухи образуются до глубины 10–12 м [2], в Печорском море при толщине льда 1,0–1,4 м стамухи образуются до глубины 18 м [6], в Карском море и в море Лаптевых при толщине льда 1,5–2,0 м стамухи образуются до глубины 26–28 м [6] и до 24 м [5] соответственно, в Восточно-Сибирском море, где толщина однолетнего льда достигает 2 м, а средняя толщина распространённых здесь многолетних паковых льдов 3–4 м, стамухи образуются на глубинах до 35 м [4].

Моделирование параметров торосистых образований в зависимости от толщины льда также показывает чёткую физическую зависимость между

Таблица 1. Аномалии мощности ледяного покрова в 2007–2014 гг., см

Год	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
2014	от –10 до –20	от –20 до +10	от –10 до –15	–20
2013	от –20 до +20	от –20 до +30	от –20 до +30	от –20 до +20
2012	от –10 до –50	от –10 до –40	от +20 до +40	+30
2011	от 0 до –30	от –10 до –20	от –10 до –30	от –20 до –30
2010	от 0 до –5	от –5 до +20	от 0 до +5	–15
2009	от +10 до –25	от +10 до +20	от 0 до –15	от –10 до –15
2008	от –15 до –20	от –15 до –30	от –5 до +10	от +10 до +15
2007	от –5 до –30	от –10 до –15	от –10 до –20	от –15 до –20

этим показателями [3]. Таким образом, в условиях потепления климата будет наблюдаться снижение размеров торосов и стамух, сокращение ширины припая, что в итоге приведёт к смещению зоны наиболее интенсивного воздействия ледяных образований на дно – в сторону суши, в зону с меньшими глубинами.

Для того, чтобы получить оценку реальной интенсивности ледово-экзарационного воздействия за прошедший ледовый сезон, необходимо проведение повторных съёмок микрорельефа дна для выделения ледовых форм, образовавшихся в период между съёмками.

Натурные геофизические наблюдения, включая мониторинговые (по одним и тем же профилям), проводились нами в Байдарацкой губе Карского моря и на трассе перехода газопровода “Бованенково–Ухта” в период с 2005 по 2012 г. [14], синхронный

заметному потеплению климата и снижению ледовитости в Карском море (рис. 2).

За последние два десятилетия продолжительность ледового сезона в Байдарацкой губе Карского моря сократилась почти на полтора месяца, образование припая сопровождается его частым отрывом (особенно со стороны Уральского берега), толщина ледяного покрова сократилась минимум на 10–15 см. В мае 2007 г. в полынье со стороны Уральского берега А.М. Камаловым было документально зафиксировано появление небольшого айсберга. Последний раз в указанном районе айсберг был зафиксирован в 1932 г., в период, также характеризовавшийся потеплением и снижением ледовитости. Вероятно, появление айсбергов в данном районе не случайно совпадает с периодами потепления. В условиях потепления происходит активизация ледников севера Новой Земли, количественно увеличивается сброс айсбергов

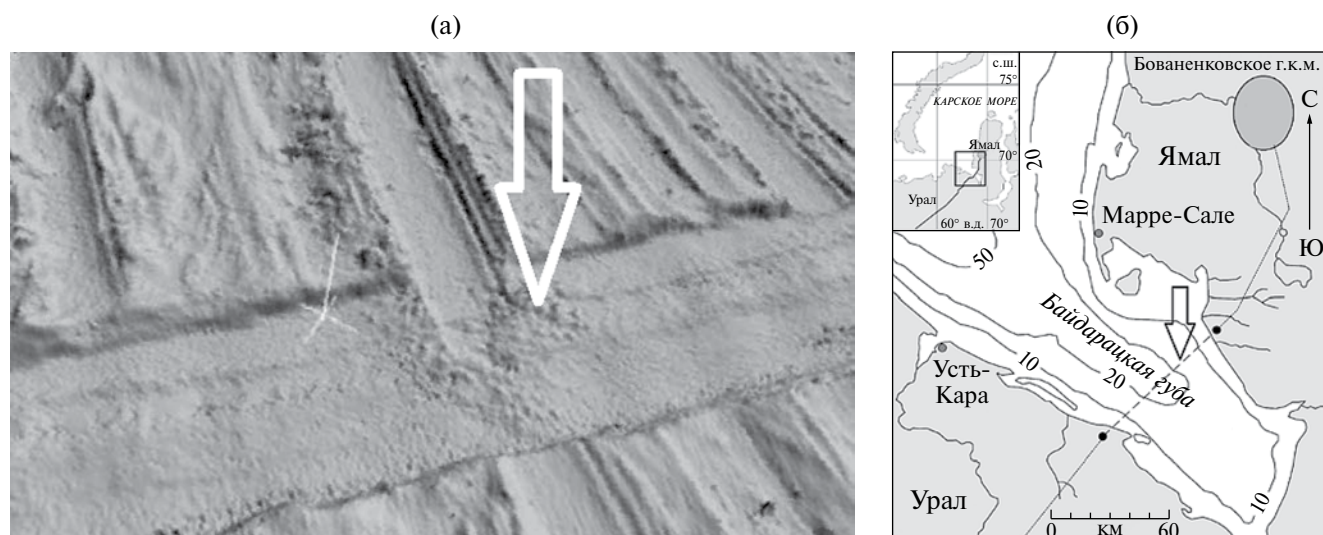


Рис. 3. Пример формирования “свежей” борозды выпахивания (а) над засыпанной траншеей нитки перехода системы магистральных газопроводов “Бованенково–Ухта” (б).

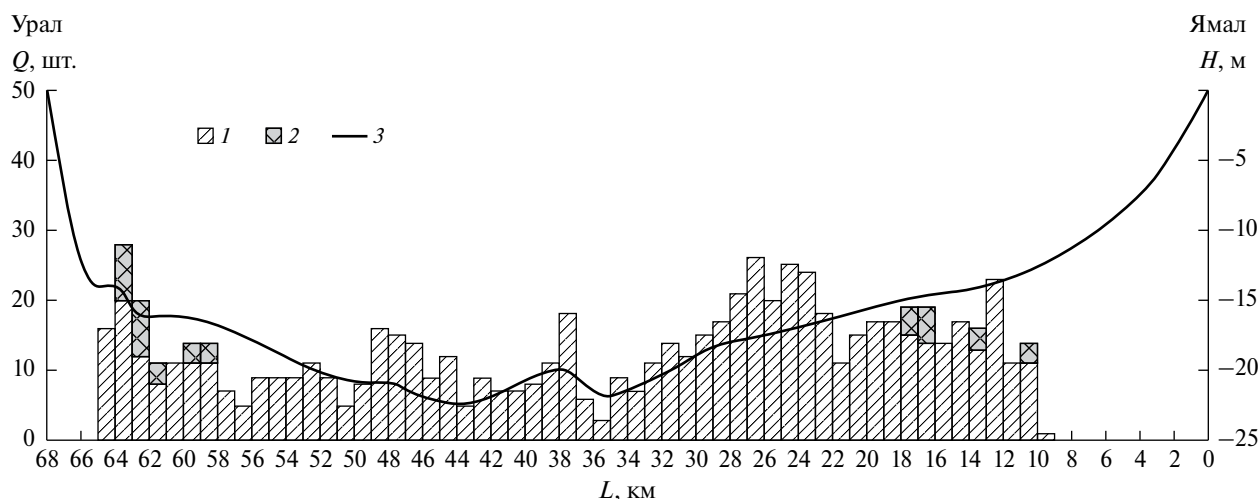


Рис. 4. Пример результатов обработки материалов геофизической съёмки за 2011–2012 гг. на трассе перехода «Бованенково–Ухта». Условные обозначения: Q – количество борозд; H – глубина моря; L – расстояние от нулевой точки профиля (Ямал); 1 – количество борозд на один погонный километр трассы газопровода; 2 – количество новообразованных борозд в холодный сезон 2011–2012 гг.; 3 – профиль дна.

в акваторию Карского моря. Система постоянных течений и протяжённые полыньи создают благоприятные условия для проникновения айсбергов в Байдарацкую губу.

В условиях засыпанной грунтом траншеи определить молодые борозды, образовавшиеся в период после строительства трубопровода, не представляет труда: свежие борозды оставляют свои следы на отсыпанном грунте траншеи, и «как на чистом листе бумаги» (рис. 3). Проведённые исследования подтвердили, что в последние годы наблюдалось сокращение мощности ледяного покрова и размеров ледяных торосистых образований, а также ширины припая. Как результат, область наиболее интенсивного ледово-экзарационного воздействия сместилась на меньшие глубины. Если ранее максимум ледово-экзарационного воздействия (по количеству и глубине ледово-экзарационных борозд) был приурочен к интервалу глубин 17–20 м, то в настоящее время эта зона сместилась на глубину 12–16 м (рис. 4). В центральной, глубоководной, части губы борозды перестали образовываться. За период наблюдений после строительства первой нитки трубопровода лишь одна борозда образовалась на глубине 20 м зимой 2009 г. Возможно, её формирование связано с проникновением обломка айсберга в Байдарацкую губу Карского моря.

На основе анализа литературных источников, моделирования и результатов натурных исследований установлено, что в условиях потепления климата и снижения ледовитости зона наиболее интенсивного ледово-экзарационного воздействия смещается в сторону суши на более мелководные участки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 16–17–00034).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арэ Ф.Э. Разрушение берегов арктических приморских низменностей. Новосибирск: Гео, 2012. 291 с.
2. Бухарицин П.И. Опасные гидрологические явления на Северном Каспии // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4/5. С. 444–452.
3. Вершинин С.А., Трусков П.А., Кузмичев К.В. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. М.: Ин-т «Гипростроймост», 2005. 208 с.
4. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Беликов С.Е. Многолетние стамухи в арктических морях сибирского шельфа // Изв. Рус. геогр. о-ва. 2007. Т. 139. № 8. С. 86–89.
5. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи моря Лаптевых // Пробл. Арктики и Антарктики. 2008. № 2 (79). С. 111–116.
6. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
7. Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане в 2007–2014 годах / Под / ред. И.Е. Фролова. Ротапринт ГНЦ РФ ААНИИ, 2008–2015.
8. Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике береговой зоны арктических морей // Водные ресурсы. 2003. Т. 30. № 5. С. 555–564.
9. Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во МГУ, 2011. 173 с.
10. Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных

- газопроводов Ямал-Центр / Под ред. Г.И. Дубикова, В.А. Совершаева, В.С. Тужилкина. М.: Геос, 1997. 432 с.
11. *Совершаев В.А.* Влияние морских льдов на развитие криолитозоны арктического шельфа. В сб.: Криолитозона арктических морей. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1981. С. 70–83.
 12. *Barnes P.W., Rawlinson S.E., Reimnitz E.* Coastal Geomorphology of Arctic Alaska / Arctic Coastal Proc. and Slope Protection Design, TCCR Practice Rept, ASCE, May, 1988. P. 3–30.
 13. *Barnes P.W., Rearic D.M., Reimnitz E.* Ice Gouging Characteristics and Processes. In: The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments. Orlando (FL): Acad. Press, 1984. P. 185–212.
 14. *Ogorodov S., Arkhipov V., Kokin O., et al.* Ice Effect on Coast and Seabed in Baydaratskaya Bay, Kara Sea // Geography, Environment, Sustainability, 2013. № 03. P. 32–50.
 15. *Reimnitz E., Barnes P.W.* Sea Ice as a Geologic Agent on the Beaufort Sea Shelf of Alaska. The Coast and Shelf of the Beaufort Sea. Arlington (VA): Arctic Inst. North America, 1974. P. 301–353.