

УДК 551.462.32(268.52–13)

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ БОРОЗД ВЫПАХИВАНИЯ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2024 г. С. В. Мазнев^{1,2,*}, О. В. Кокин^{1,2}, В. В. Архипов^{1,2}, Е. А. Мороз¹,
А. П. Денисова^{1,2}, Р. А. Ананьев³, С. Л. Никифоров³, Н. О. Сорохтин³, С. В. Годацкий¹

¹ Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт океанологии им. П.П. Ширинова Российской академии наук, Москва, Россия

* e-mail: svmaznev@gmail.com

Поступила в редакцию 16.07.2023 г.

После доработки 12.09.2023 г.

Принята к печати 28.12.2023 г.

Ледово-экзарационный рельеф дна юго-западной части Карского моря сформирован в результате воздействия айсбергов и морского льда. По результатам съемки дна многолучевым эхолотом в ходе 52 рейса НИС “Академик Николай Страхов” впервые собрана репрезентативная выборка замеров ключевых параметров (пространственное положение, ориентировка, глубина, ширина) ледово-экзарационных борозд, что позволяет делать выводы в региональном масштабе. Получены закономерности распределения борозд в пространстве и по глубинам, определена их плотность на различных участках дна. Выявлено, что максимальные размеры борозд уменьшаются по мере удаления от источников айсбергообразования с СЗ на ЮВ. Ориентировка борозд соотносится с основными направлениями дрейфа айсбергов. Большая часть борозд располагается на глубинах до 220 м и могла сформироваться как при современном, так и при более низком уровне моря (в послеледниковое время). Выявлена высокая степень переработки дна ЮЗ части Карского моря в ходе ледового выпаживания.

Ключевые слова: ледово-экзарационный рельеф, ледовая борозда, пугмарки, рельеф дна, айсберг, съемка дна

DOI: 10.31857/S0030157424030103, **EDN:** QCALLG

ВВЕДЕНИЕ

Ледово-экзарационный рельеф формируется при взаимодействии дрейфующих ледяных образований (состоящих из морского, ледникового льда или смешанных) с морским дном [5, 8]. Если контакт с дном не останавливает дрейф ледяного образования, то в результате формируются специфические формы — борозды выпаживания, также известные как ледово-экзарационные борозды или пугмарки [4]. При прекращении дрейфа и посадке ледяного образования на мель образуются котловины и ямы выдавливания (ямы застывания).

Исследование ледово-экзарационного рельефа арктического шельфа представляет интерес как с научной, для улучшения понимания проблемы воздействия ледяных образований на дно арктических морей, так и с практической точек зрения. Арктический регион рассматривается как один из основных источников углеводородного сырья в будущем и уже давно подвергается активному хозяйственному освоению. В связи с этим изучение и лучшее понимание процессов ледо-

вого выпаживания дна, особенно на фоне климатических изменений, стало в настоящее время особенно актуальным [3]. В полярных областях наблюдается более быстрое изменение климата, чем в умеренных широтах [9, 20]. Именно в этих меняющихся условиях будет продолжаться активное освоение столь труднодоступных территорий. Айсберговая и ледовая опасность является природным риском освоения шельфа Арктики и Северного морского пути (СМП), неблагоприятно сказывающимся на строительстве и эксплуатации сооружений на Баренцево-Карском шельфе и на следовании судов по трассе СМП [15].

В настоящей статье рассматривается ледово-экзарационный рельеф, изученный в ходе 52-го рейса научно-исследовательского судна “Академик Николай Страхов” в 2021 г. Основная часть материалов была получена в юго-западной части Карского моря (рис. 1). До настоящего момента рельеф дна этого региона неоднократно исследовался [1–6, 10–14, 16–19], в том числе встречаются упоминания ледово-экзарационного рельефа. Но при этом не была детально

исследована морфология борозд выпаживания. Исключение составляет лишь Байдарацкая губа, где исследования проводились неоднократно [2, 5, 17, 18 и др.], но это лишь небольшая часть рассматриваемого региона, где преобладают воздействия морского льда на дно, тогда как на большей части юго-запада Карского моря, вероятнее всего, распространены борозды айсбергового выпаживания. Последние исследования возраста одной из наиболее крупных борозд, располагающейся на глубине около 30 м перед входом в Байдарацкую губу [11], говорят о том, что она сформировалась в 1810 ± 30 г. н. э. На основании этого предполагается, что айсберговые борозды Байдарацкой губы образовались преимущественно в XX в. после окончания Малого ледникового периода, когда размер айсбергов уменьшился, и они смогли проникать внутрь губы [11]. В данной статье впервые собрана репрезентативная выборка замеров ключевых параметров ледово-экзарационных борозд, что позволяет делать выводы в региональном масштабе. При оценке параметров борозд наибольшее внимание уделялось именно максимальным размерам форм рельефа. Это было сделано по следующим причинам:

1. Задачей исследования являлось определение максимально возможной глубины вреза и ширины борозды, что показывает наибольшие возможные размеры участвующих в процессе ледяных образований (так называемый инженерный подход).

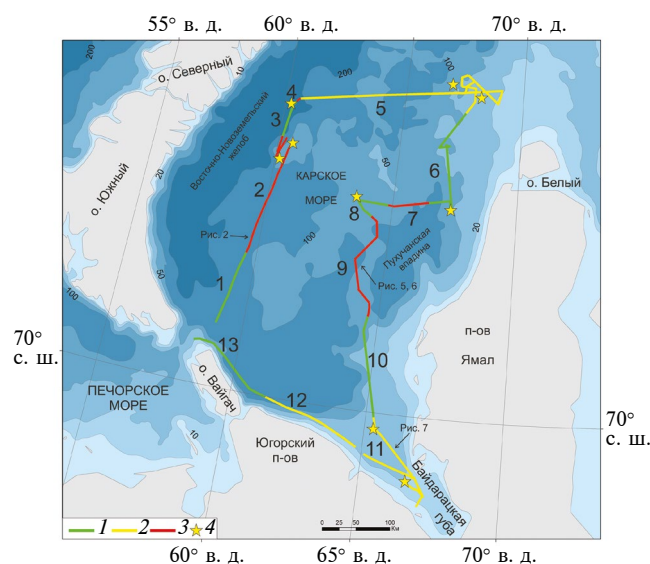


Рис. 1. Участки районирования распределения борозд выпаживания на дне Карского моря по маршруту 52-го рейса НИС “Академик Николай Страхов”: 1 – участки без борозд, 2 – участки с низкой плотностью борозд, 3 – участки с высокой плотностью борозд, 4 – участки полигональной съемки.

2. Определение средних значений ширины и глубины затруднительно, так как требует обработки всех борозд, включая самые маленькие. Установление их генезиса и сам замер затруднительны при имеющемся разрешении и масштабе исследования.

Полученные количественные оценки закономерностей пространственного распространения и морфологии ледово-экзарационного рельефа в зависимости от внешних условий могут быть использованы при планировании стратегии хозяйственного освоения шельфа и в рекомендациях проектировщикам для улучшения инженерных решений при строительстве различных объектов на шельфе (трубопроводы, буровые и добычные платформы и т. д.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным оборудованием для съемки рельефа дна в 52 рейсе НИС “Академик Николай Страхов” [16], являлась штатная судовая гидроакустическая система картирования морского дна фирмы RESON (Дания). Данная система включает в себя:

- программно-аппаратный комплекс SeaBat, включающий многолучевые эхолоты SeaBat 8111 (мелководный) и SeaBat 7150 (глубоководный);
- GPS, сенсоры движения и гироскоп, объединенные в приборе Applanix POS-MV;
- датчик скорости звука у антенн эхолотов SVP-70;
- программный пакет сбора и обработки данных – PDS2000;
- высокочастотный профилограф EdgeTech 3300 (США).

Приемо-передающие антенны многолучевых эхолотов и профилографа установлены в гондоле, приваренной к днищу судна.

Результаты съемки сохраняются программным комплексом в формате .log, после чего происходит их обработка. На этапе перед началом съемки оператором настраиваются программные фильтры по глубине и качеству сигнала (в зависимости от ожидаемых на участке глубин), иногда выполняется настройка дополнительных фильтров, таких как угловой, фильтр с применением метода скользящего среднего и других. Задаются параметры скорости звука в водной среде, измеренные на станциях в ходе рейса. Затем, после сохранения данных на носителе, происходит ручная постобработка материалов оператором. Отсев и удаление лучей, данные которых выглядят ошибочными или неточными, происходит экспертным методом. В отдельных случаях, при некорректной работе

некоторых приборов (нарушенной стабилизации гирокомпасов при штормовой погоде и т. п.) или других программных ошибках в данных, на стадии конвертации ЦМР из первичного формата в формат .asc, применяются программные настройки для исправления искривлений, невязок и т. п. Для построения результирующей ЦМР, пригодной для обработки и дешифрирования борозд, из исходного файла задаются настройки разрешения (ЦМР в данном случае строилась с размером пикселя 10×10 м), способа осреднения данных и настройки отображения. Таким образом, результирующая ЦМР (рис. 2) имеет разрешение 10 м в плане и от 0.1 до 1.0 м по глубине, что сильно зависит от погодных условий.

Всего в ходе работы над исходными данными было обработано около 4460 км или 2400 морских миль съемки дна Карского моря на глубинах от 10 до 380 м. Ширина полосы съемки зависит от глубины и составляет от 50 до 1200 м. По характеру полученных данных съемка делится на площадную (полигоны) и транзитную (вдоль одиночного галса), соединяющую полигоны. Все результаты съемки в пределах района изучения были разделены на 30 отрезков, из которых 13 были полигонами, а 17 — транзитами. Протяженность транзитной съемки без учета работы на полигонах составила около 2500 км (1350 морских миль).

При дешифрировании в среде ArcMap 10.2 использовалась следующая последовательность действий. Был создан шейп-файл (.shp) с атрибутивной таблицей со столбцами: номер, ширина, глубина, диапазон глубины моря. По каждому из отрезков съемки проводился последовательный осмотр ЦМР на предмет наличия ледово-эскарпационных форм рельефа. Выделенные формы заносились в созданный шейп-файл. После этого производились замеры ширины и глубины крупных форм. При этом изначально к крупным формам были отнесены все глубины более 1.0 м, но в процессе дешифрирования было выявлено, что их количество составляет больше 60% от всех борозд, и критерий был повышен до 1.5 м. При замерах ширины и глубины использовалась следующая техника. Форма визуально осматривалась на ЦМР, выбирались характерные места для построения поперечных профилей. В зависимости от длины сегмента борозды, попавшего в пределы съемки, строилось от 2 до 15–20 поперечных профилей, с целью выявления наиболее глубоких мест в борозде. В атрибутивную таблицу заносилась не средняя, а максимальная глубина. Глубина определялась следующим образом. Так как основной целью является выявление максималь-

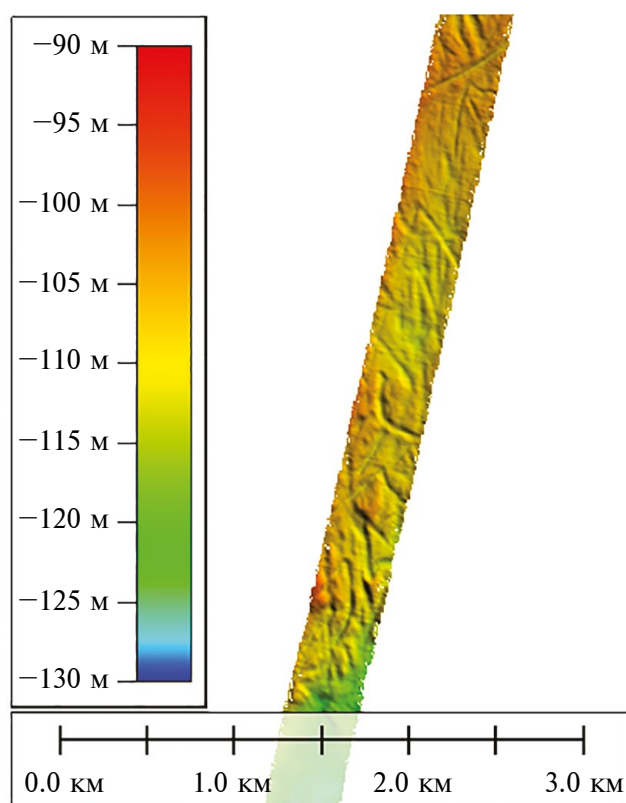


Рис. 2. Пример ЦМР с высокой плотностью борозд (участок 2, положение см. на рис. 1).

ного вреза относительно фоновой поверхности, над которой возвышаются валики бокового отвала, обрамляющих борозды (бортики обваловки), то сначала определялись соответствующие уровни, а затем производился замер. Но в большинстве случаев боковые валики не выражены, и определение уровня фоновой поверхности представляет трудность из-за ограниченной ширины полосы съемки, различных форм рельефа дна (моренных холмов, осадочных гряд, подледниковых каналов и др.) или неправильной формы самой борозды. Поверхность зачастую обладает большим количеством неровностей (особенно в случае интенсивной “изборозжденности”) или имеет постоянный уклон. В таком случае для определения глубины выбирались самые низкие характерные перегибы рельефа — бровки борозд или вершины межбороздовых гряд. Это позволяет оценить видимую глубину ледовых форм в случаях отсутствия четкого уровня фоновой поверхности и выраженных боковых валиков.

После определения ширины по поперечным профилям проводилась верификация ширины по ЦМР. В некоторых случаях ширина, определенная по ЦМР, отличалась от определенной по поперечным профилям из-за того, что борозда может быть вложена в более крупную от-

рицательную форму рельефа, и их соотношение лучше видно в плане. В атрибутивную таблицу заносились ширина и глубина с одного сечения (определенные тем или иным способом), а не максимальные, определенные на разных сечениях. Это делалось для того, чтобы определить соотношение глубины к ширине без искажений. Приоритет имела глубина форм. После построения поперечных профилей проводилась корректировка: некоторые борозды оказывались невыраженными или признавались ошибочно выделенными, другие демонстрировали неэкзарационный генезис и исключались из выборки. При детальном просмотре ЦМР в некоторых случаях на этой стадии выделялись дополнительные борозды, упущенные на предыдущей стадии.

Впоследствии проводилась поинтервальная классификация глубин вдоль маршрута съемки, на которых располагались борозды выпаживания. ЦМР были последовательно разбиты на 20-метровые диапазоны, значения которых были присвоены попадающим в них бороздам и занесены в атрибутивную таблицу. Затем при помощи специально написанного скрипта для консоли Python в среде QGIS3.6 были определены направления (ориентировка) борозд, вычисляемые как направление линии, соединяющей начало и конец дешифрируемой части борозды, состоящей из нескольких сегментов, или как направление борозды, состоящей из одного сегмента. Это соответствует результирующему вектору движения ледяного образования. Значения приведены к сегменту от 0° до 180° и добавлены в атрибутивную таблицу. Длина борозд не определялась, так как большая часть борозд не попадала целиком в съемочную полосу.

На последнем этапе было выполнено районирование всего маршрута по плотности борозд, выделен ряд участков. Сведения о принадлежности борозд к тому или иному участку были занесены в атрибутивную таблицу. Затем данные из атрибутивной таблицы были выгружены и статистически обработаны в MS Excel. Была получена общая описательная статистика как для всей выборки ледово-экзарационных борозд, так и статистика по каждому выделенному району (участку) отдельно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам дешифрирования материалов съемки дна Карского моря в 52-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» обнаружено 1319 борозд выпаживания. 546 из них относятся к крупным бороздам (глубиной более 1.0–1.5 м), по данным замеров глубины и ширины которых проведена ста-

тистическая обработка. Таким образом, крупные борозды составляют около 41% от всех дешифрированных борозд Карского моря. С учетом съемки полигонов плотность борозд составила около 1 борозды на 3.3 км съемки (0.3 шт./км). Однако, такая оценка может быть не совсем объективной, так как полигоны выбирались для съемки определенных объектов, например, подводных каньонов, где экзарационных борозд не было. В то же время, на некоторых полигонах оказывалось довольно много борозд, которые не были бы сняты при обычной транзитной съемке. Без учета полигонов плотность борозд составила около 1 борозды на 1.5 км транзитной съемки (0.67 шт./км). По-видимому, реальная плотность борозд находится где-то между этими значениями и составляет около 1 борозды на 2.1 км съемки (0.5 шт./км). Плотность борозд неравномерна и очень сильно различается в зависимости от конкретного участка. Сводная таблица 1 представляет статистические параметры борозд по участкам съемки дна Карского моря. Средние значения вычислены только по данным измеренных значений крупных борозд, а не всех дешифрированных борозд. Значения максимальных глубины и ширины борозд в таблице могут относиться к разным бороздам участка.

По выделенным участкам борозды выпаживания распределены следующим образом:

1. На *участке 1* (рис. 1) вдоль южной части Южного острова Новой Земли на глубинах 125–200 м борозд нет.

2. На следующем за ним *участке 2*, расположенном вдоль средней части Южного острова Новой Земли, наблюдается высокая плотность борозд – около 1 борозды на каждые 310 м съемки (3.2 шт./км). Глубина на участке составляет в среднем около 120 м (от 60 до 220 м). На участке насчитывается 297 крупных борозд, т. е. около 1 борозды на 0.7 км (1.4 шт./км). При этом на двух отрезках с глубинами 150–200 м они не встречаются. Максимальная плотность борозд в северной части участка достигает 5.2 шт./км.

3. На *участке 3* с глубинами 200–350 м борозд нет.

4. *Участок 4* приурочен к относительно большим глубинам (240–320 м), тем не менее относится к участкам с повышенной плотностью борозд. В среднем 1 борозда встречается через каждые 150 м (6.4 шт./км), при этом почти половина борозд относится к крупным, в среднем 1 крупная борозда встречается каждые 330 м (3.0 шт./км).

5. *Участок 5* характеризуется низкой концентрацией борозд, 1 борозда в среднем на 3.8 км (0.26 шт./км). Плотность крупных борозд также

Таблица 1. Характеристика участков съёмки дна Карского моря

№	Географическое положение	Глубина моря, м	Средняя / максимальная глубина борозд, м	Средняя / максимальная ширина борозд, м	Преобладающая ориентировка	Плотность борозд, шт/км	Доля крупных борозд, %
1	Западный склон центрального поднятия, к В от южной части Южного острова Новой Земли, к СВ от пролива Карские ворота	125–200	—	—	—	0	—
2	Западный склон центрального поднятия, к В от средней и северной частей Южного острова Новой Земли	60–220	$\frac{2.5}{9.4}$	$\frac{81.5}{476}$	ССЗ-ЮЮВ	3.2	42
3	Восточный борт Восточно-Новоземельского желоба, к В от пролива Маточкин Шар	200–350	—	—	—	0	—
4	Восточный борт Восточно-Новоземельского желоба к В от южной части Северного острова Новой Земли	240–320	$\frac{2.2}{4.6}$	$\frac{54.3}{102}$	С-Ю	6.4	47
5	От Восточно-Новоземельского желоба до отмели к С от о. Белый	15–280	$\frac{2.9}{7.0}$	$\frac{70.1}{171.0}$	ССЗ-ЮЮВ	0.26	43
6	К 3 от о. Белый	50–60	—	—	—	0	—
7	Северный склон Пухучанской впадины, к 3 от северного Ямала	60–110	$\frac{2.2}{5.9}$	$\frac{74.5}{148.0}$	С-Ю	1.5	31
8	К 3 от северного Ямала	40–70	—	—	—	0	—
9	Западный склон Пухучанской впадины, к 3 от среднего Ямала	60–140	$\frac{2.3}{4.6}$	$\frac{64.3}{130.0}$	ВСВ-ЗЮЗ	3.9	49
10	К 3 от о-вов Шараповы Кошки	35–100	—	—	—	0	—
11	Байдарацкая губа и прилегающие южные районы	10–40	$\frac{2.0}{2.5}$	$\frac{40.8}{55.0}$	СЗ-ЮВ	0.5	6
12	Вдоль Югорского полуострова	25–200	—	—	СЗ-ЮВ	0.05	0
13	Вдоль о. Вайгач	75–200	—	—	З-В	<0.01	0

ниже и составляет около 1 борозды на 9 км (0.1 шт./км). На участке встречаются самые разные глубины (от 15 до 280 м), но наибольшая плотность борозд приурочена к глубинам 30–40 м.

6. Участок 6 с глубинами 50–60 м к западу от о. Белого характеризуется отсутствием борозд.

7. Затем на небольшом участке 7 длиной 55 км с глубинами 60–110 м наблюдается высокая плотность борозд — около 1 борозды на 650 м съёмки (1.5 шт./км). Крупные борозды встречаются каждые 2 км (0.5 шт./км).

8. На участке 8 с глубинами 40–70 м борозд нет.

9. На участке 9 с глубинами 60–140 м дешифровано множество борозд, причем максимальная плотность наблюдается на глубинах 80–110 м в середине участка и достигает 1 борозды на 250 м съёмки (3.9 шт./км). В начале и конце участка плотность составляет около 1 борозды на 1.4 км (0.7 шт./км). Максимальная плотность крупных борозд на участке составляет около 1 борозды на 450 м (2.2 шт./км).

10. Участок 10 с глубинами 35–100 м характеризуется отсутствием борозд.

11. В Байдарацкой губе (участок 11) борозды распределены неравномерно, есть участки с глубинами 20–25 м совсем без борозд. На входе в губу борозды обнаружены на глубинах 25–32 м, плотность составляет около 1 борозды на 3 км (0.3 шт./км). Максимальная плотность наблюдается в центральной части губы и составляет около 1 борозды на 2 км съёмки (0.5 шт./км). В Байдарацкой губе зафиксировано всего 4 крупных борозды.

12. Участок 12 вдоль северного берега Югорского полуострова характеризуется крайне низкой концентрацией борозд выпаживания — около 1 на 21.5 км (0.05 шт./км). Глубины здесь постепенно увеличиваются с юго-востока на северо-запад с 25 до 200 м.

13. На участке 13 вдоль о. Вайгач с глубинами 75–200 м зафиксирована одна борозда. Она располагается в конце участка, к В от прол. Карские Ворота. Тем не менее участок на схеме отмечен

как с отсутствием борозд, так как практически на всем его протяжении борозды отсутствуют, а единственная борозда не относится к крупным. Крупные борозды на последних участках вообще не обнаружены.

Как уже говорилось, крупные борозды составляют около 41% от всех борозд. В центральной и северной частях рассматриваемого района (участки 2, 4, 5, 7, 9) крупные борозды составляют 42–49%, только на участке 7 концентрация ниже – 31%. А в южной части (участки 11–13) крупные борозды практически отсутствуют, их всего 4 на три участка, что составляет всего 6%.

Таким образом, если рассматривать исследованную юго-западную часть Карского моря, наибольшая плотность борозд приурочена к ее центральной части. Мы считаем исследованные борозды следами воздействия на дно айсбергов, а не торосистых ледяных образований, состоящих из морского льда. Основной причиной является глубина, на которой они обнаружены. Максимальная глубина воздействия современных ледяных торосистых образований на дно не превышает 26 м [18], таким образом, даже с учетом изменения уровня моря [7], на большинстве участков взаимодействовать с дном могут лишь айсберги [12]. Почти все изученные участки находятся в отдалении от береговой зоны, где торосы встречаются реже. Исключением являются лишь борозды в Байдарацкой губе, но по ряду морфологических признаков (плоское дно, ориентировка и др.) крупные борозды здесь также можно отнести скорее к айсберговым.

Участки с большой концентрацией борозд перемежаются участками, на которых их совсем нет. Это может быть связано как с направлениями дрейфа айсбергов, которые редко попадают в южную часть района исследования и проходят над северной частью, не задевая дно на больших глубинах, так и с локальными условиями. В за-

падной части маршрута борозды практически не встречаются на глубинах больше 125 м, при этом наибольшая плотность приходится на глубины 90–120 м. В восточной части борозды не встречаются на глубинах 40–70 м, при этом на глубины 70–125 м приходится наибольшая плотность. В Байдарацкой губе исследованные борозды приурочены к глубинам 10–40 м. Распределение борозд по 20-метровым диапазонам глубин в изученном районе представлено на рис. 3. Небольшой пик наблюдается на глубинах 20–40 м и относится к юго-восточной части изученного района (Байдарацкая губа и прилегающие части Карского моря). Большая часть борозд располагается на глубинах 60–160 м – это 93% крупных борозд и 87% от всех борозд. При этом в интервал глубин 80–100 м попадают 45% крупных и 39% всех борозд. При расчете относительной плотности борозд на км съемки основной пик также приурочен к интервалу 80–100 м (рис. 3). Дополнительный пик на глубинах 260–300 м объясняется малой протяженностью участков с такими глубинами, на которые пришлось значительное количество борозд. Средняя глубина, на которой обнаружены борозды – 108 м. Распределение борозд по глубине близко к логнормальному (рис. 4). Зависимости между глубиной, на которой обнаружены борозды, и их морфометрическими параметрами сложны и подробно описаны в [10]. В общем случае их можно охарактеризовать как увеличение размеров борозд с глубиной при историческом изменении уровня моря.

По всей исследованной акватории Карского моря глубина крупных борозд, для которых проведены замеры, достигает 9.4 м. При этом средняя глубина составляет 2.4 м (медианное значение – 2.2 м); глубина 97% борозд не превышает 5 м, 50% борозд имеют глубину до 2 м. Глубину более 5 м имеют лишь 11 борозд. Предположительно, некоторые из них имеют не чисто экзарационное

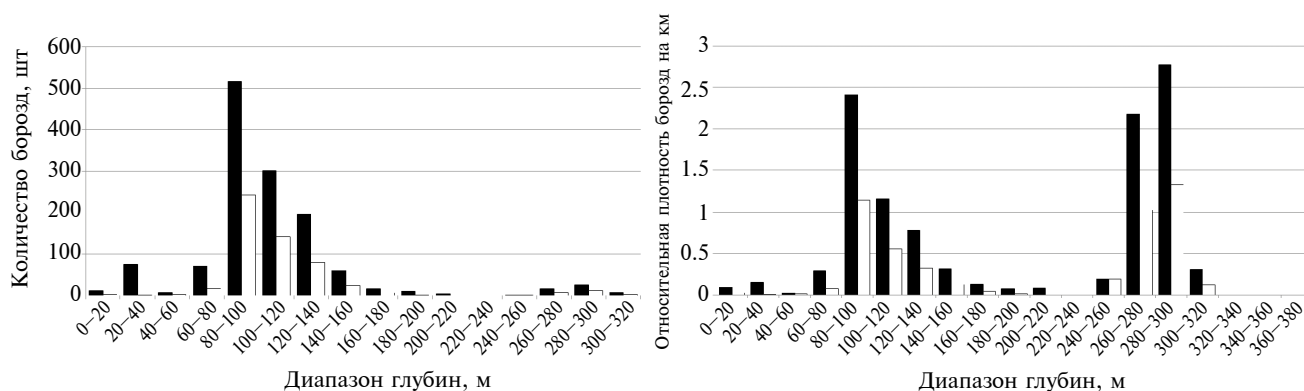


Рис. 3. Распределение (слева) и относительная плотность (справа) борозд выпахивания по 20-метровым диапазонам глубин. Черным – все борозды, белым – крупные борозды.

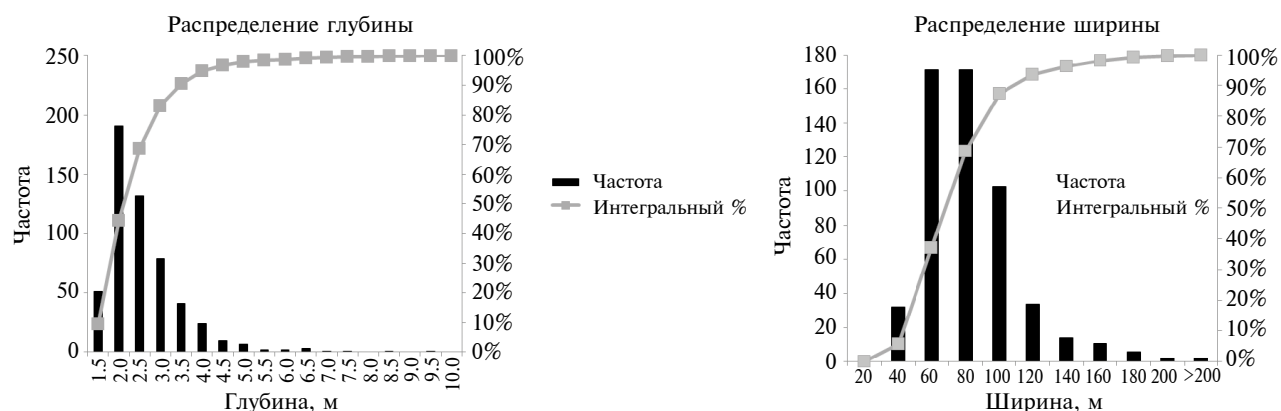


Рис. 4. Распределение значений глубины и ширины борозд выпаживания

происхождение, а подработаны последующими эрозионными процессами, что могло увеличить их изначальную глубину. Самые глубокие борозды приурочены к району близ Новой Земли (участок 2), но также глубокие (до 7.4 м) борозды встречаются и в северной части исследованного района (участок 5). На последнем участке наблюдается наибольшая средняя глубина среди всех — 2.9 м. Наименее глубокие борозды приурочены к Байдарацкой губе и прилегающей южной части Карского моря, наибольшая глубина здесь достигает 2.5 м, средняя — 2.0 м. Такое распределение можно объяснить близостью участков 2 и 5 к районам айсбергообразования и их расположением на пути дрейфа [12] и удаленностью от них Байдарацкой губы.

Ширина борозд колеблется от 23 до 476 м и в среднем составляет 74 м (медианное значение 68 м). 98% борозд имеют ширину менее 160 м,

87% — менее 100 м. В приновоземельском районе борозды не только самые глубокие, но и самые широкие. Средняя ширина составляет 81.5 м, тогда как на других участках она в среднем минимум на 7 м меньше. На относительно глубоководном участке 4 борозды имеют небольшую ширину — до 102 м (в среднем — 54 м). В южной части исследованного района борозды наименее широкие — до 55 м (в среднем — 41 м). Распределение величин близко к логнормальному (рис. 4). Отношение глубины борозды к ее ширине не показывает какой-либо зависимости между этими величинами. Оно колеблется от 1:8 до 1:207. В среднем глубина борозды относится к ее ширине как 1:33, 97% укладываются в отношение 1:10–1:70.

Форма поперечного профиля борозд U-образная (рис. 5) или V-образная (рис. 6), реже — ящикообразная (рис. 7) или W-образная. Преобладают единичные борозды, редко встречаются

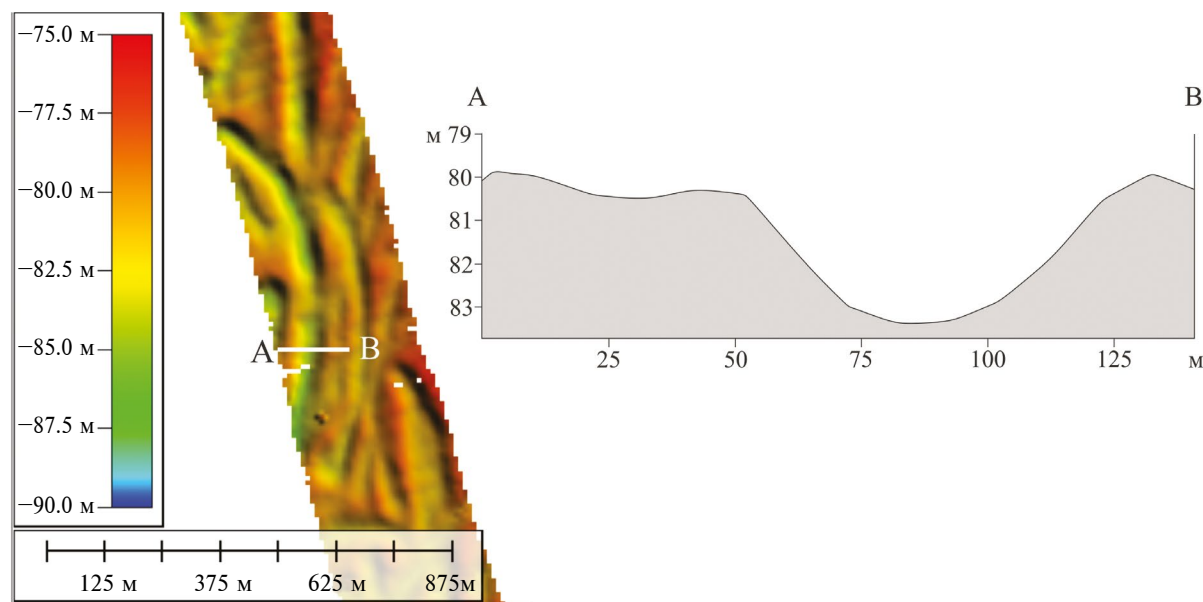


Рис. 5. Плановый вид и поперечный профиль через U-образную борозду к востоку от среднего Ямала (участок 9, положение см. на рис. 1).

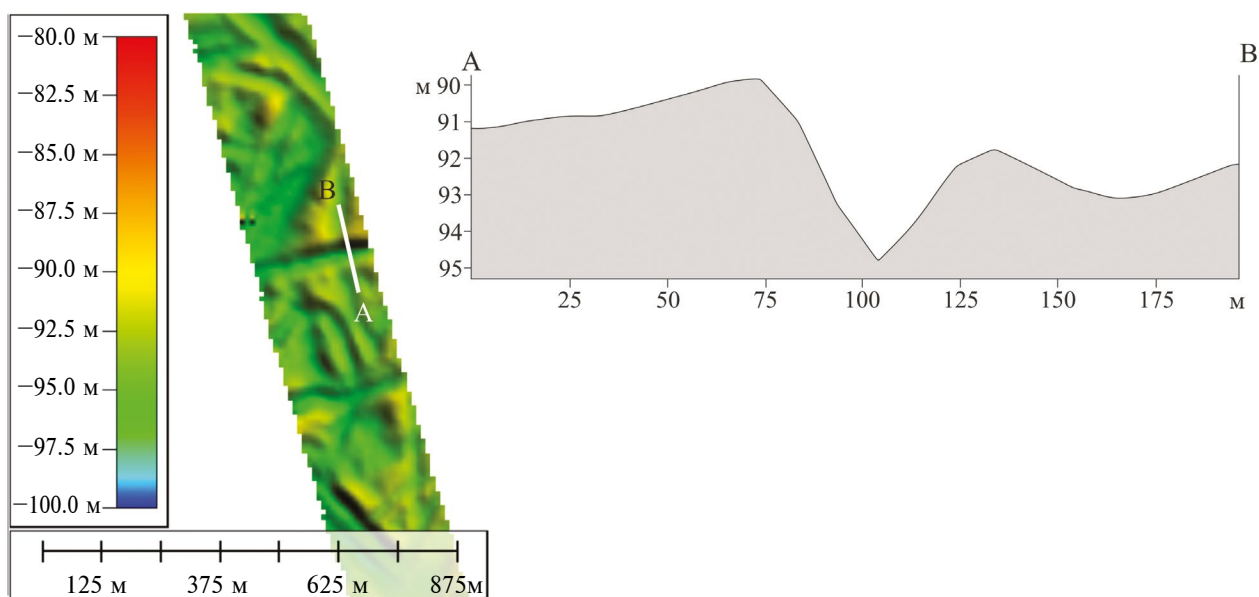


Рис. 6. Плановый вид и поперечный профиль через V-образную борозду к востоку от среднего Ямала (участок 9, положение см. на рис. 1).

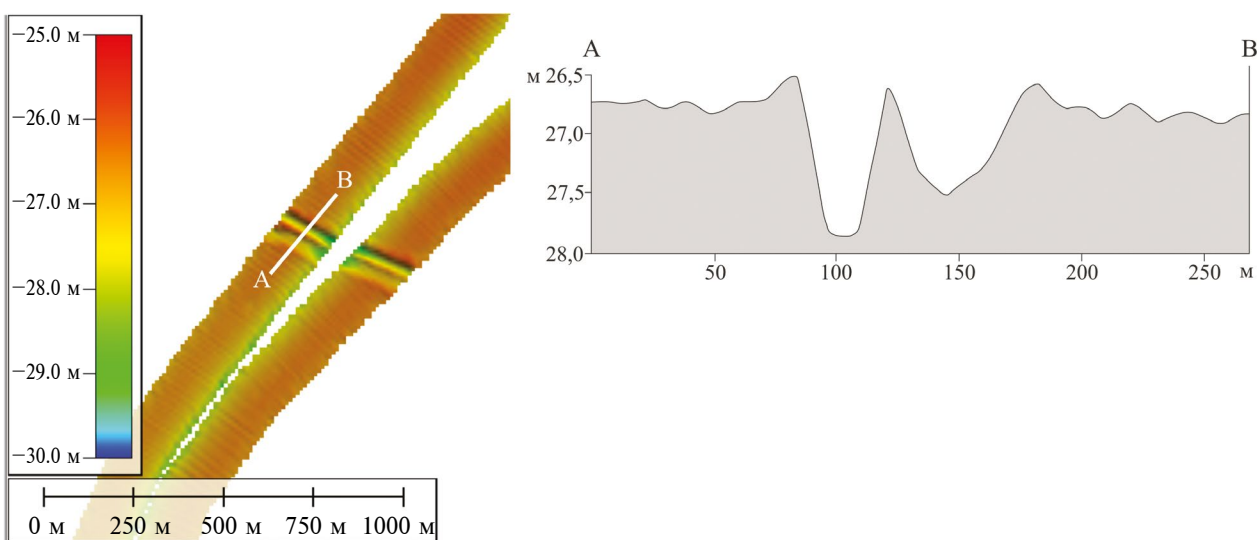


Рис. 7. Плановый вид гребенки из двух борозд в Байдацкой губе (участок 11, положение см. на рис. 1), одна из которых (на профиле — слева) имеет ящикообразный поперечный профиль.

гребенки параллельных борозд. Боковые валики чаще всего не выражены, но есть борозды с валиками высотой более 1 м (рис. 7).

Основным направлением борозд выпахивания в юго-западной части Карского моря является субмеридиональное, особенно сильно это выражено для крупных борозд (рис. 8). Другой выраженный пик направлений борозд — субширотный. Однако, эти направления не являются подавляющими, множество борозд имеют промежуточные азимуты, и, в целом, в этом компоненте распределены довольно равномерно. Зависимости между направлением борозд и их статистическими параметрами (глубиной, шириной и глубиной

моря) не выявлено. Как правило, борозды имеют несколько сегментов с различными направлениями, реже плавно изгибаются. Существенная часть борозд прямолинейная. Борозды меняют направление на угол от нескольких градусов до 150–160°.

Однако, на разных участках (в разных районах) направления борозд заметно отличаются (рис. 9). Так, на участке 2 близ Новой Земли они имеют преимущественную ССЗ–ЮЮВ ориентировку. На соседнем 4 участке С–Ю ориентировка дополняется существенным по количеству борозд СЗ–ЮВ направлением, тогда как ССЗ–ЮЮВ значительно меньше. Все эти направления примерно соответствуют азимутам участков по отношению к основ-

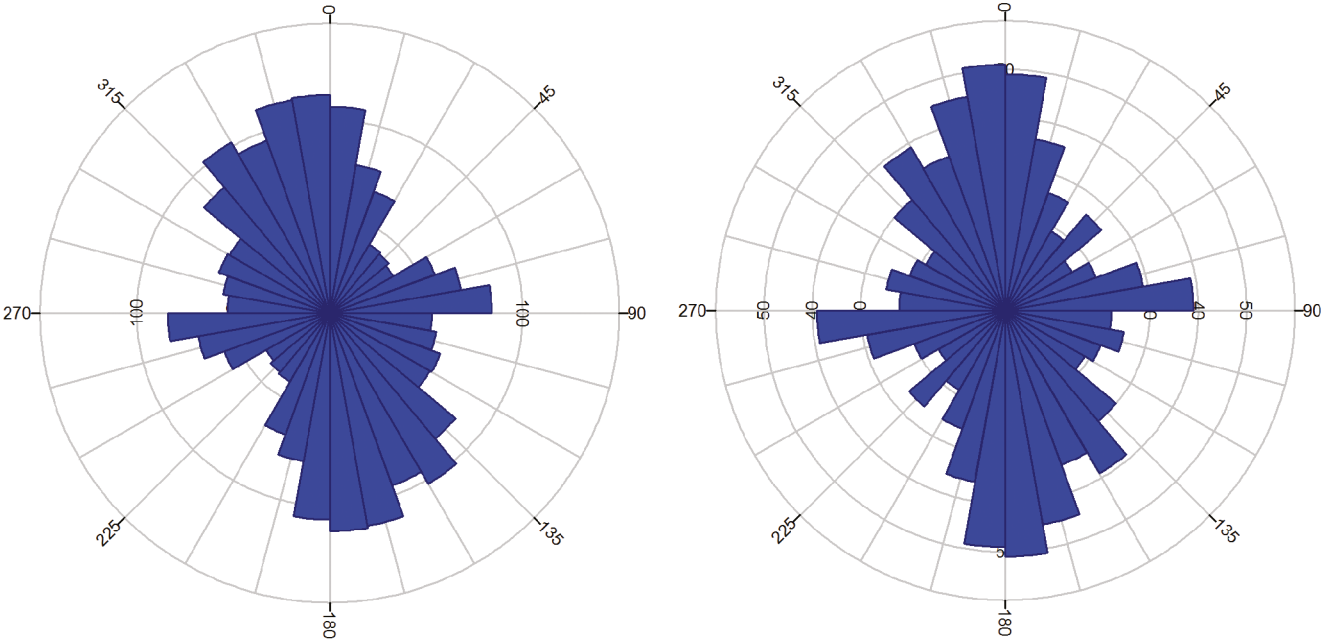


Рис. 8. Направления борозд выпаживания: слева – все борозды, справа – крупные борозды.

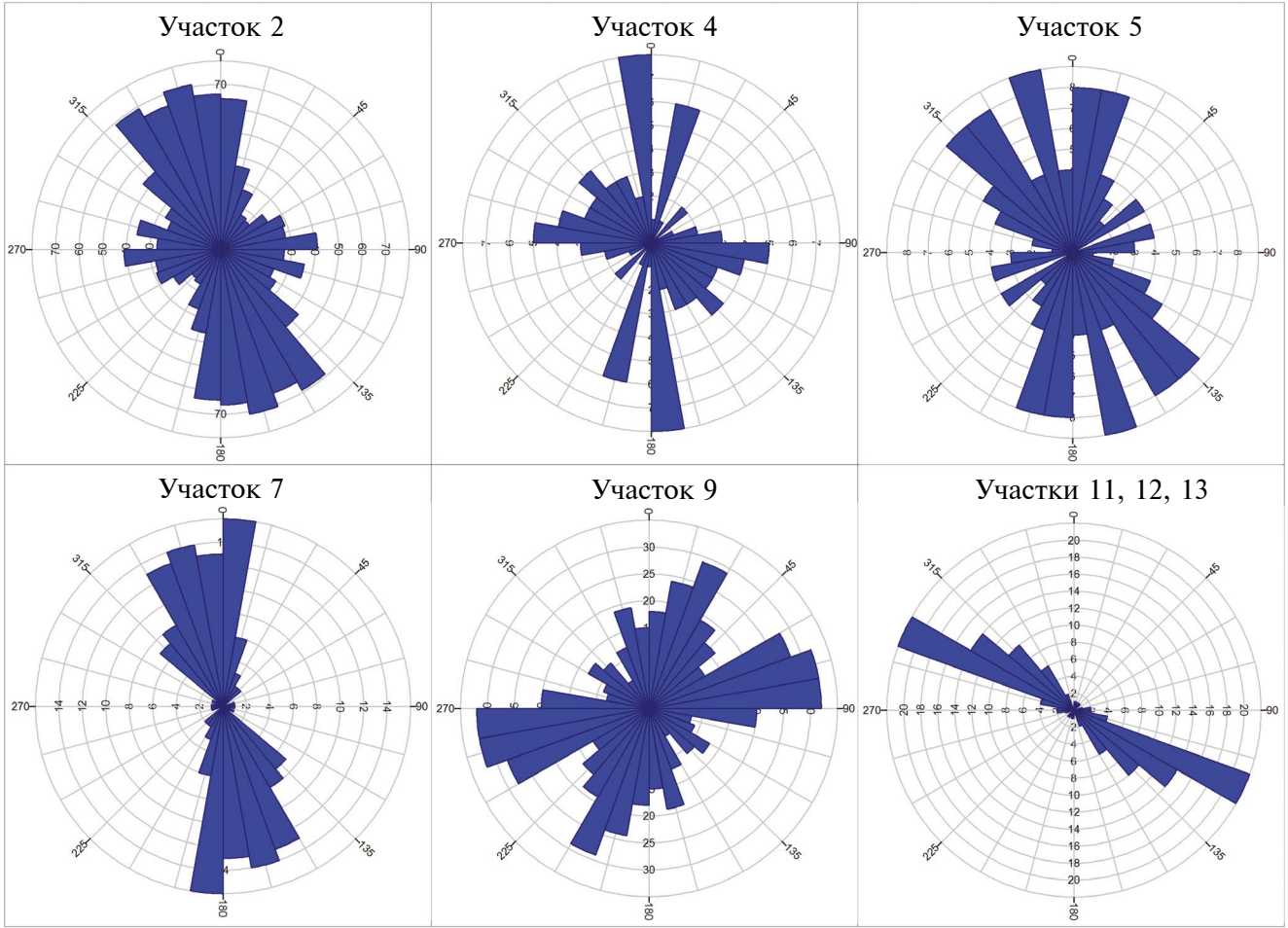


Рис. 9. Направление борозд по участкам.

ным источникам образования айсбергов. На участке 5 к вышеуказанным направлениям добавляется ССВ—ЮЮЗ. Борозды с таким направлением могут быть оставлены айсбергами, подхватываемыми Ямальским течением, которое в этом районе имеет примерно такую ориентировку. Ориентировка борозд на участке 7 субмеридиональная, с небольшим уклоном на ССЗ—ЮЮВ, что схоже с участком 2. На данном участке борозды наиболее четко сориентированы в одном направлении. Учитывая географическое положение участка и ориентировку борозд на соседних участках, такая картина выглядит не совсем ожидаемо. Участок 9 демонстрирует два основных направления борозд: ССЗ—ЮЮВ и ВСВ—ЗЮЗ. Вероятно, на данном участке происходило изменение направлений дрейфа айсбергов, связанное со встречей здесь меняющего направление Восточно-Новоземельского и Ямальского течений. На участках в Байдарацкой губе и вдоль берега Югорского полуострова направления борозд соответствуют основному протиранию губы и линии берега.

ВЫВОДЫ

По результатам исследования можно сделать следующие выводы. Максимальные размеры борозд уменьшаются по мере удаления от источников айсбергообразования с СЗ на ЮВ. За исключением участка напротив северного Ямала, ориентировка борозд в целом соотносится с основными направлениями дрейфа айсбергов. Средние величины глубины борозд выпахивания по участкам исследованного района Карского моря различается незначительно — от 2.0 до 2.9 м (коэффициент вариации 0.40), как и средняя ширина — от 41 до 82 м (коэффициент вариации 0.44). Доля крупных борозд также незначительно варьирует, и в северной части немного меньше, чем в центральной (31% против 42–49%), и значительно меньше в южной (6%). Если отсутствие борозд на глубинах 125–350 м (участки 1, 3 и 13) из-за слишком больших глубин и на глубинах 35–125 м в южной части (участки 10, 13) из-за удаленности ожидаемо, то отсутствие борозд на глубинах 40–70 м в центральной части изученного района (участок 8) можно считать неожиданным. Также не до конца объяснимо то, что такие участки соседствуют с участками с высокой плотностью без каких-то выраженных переходных участков со средней плотностью. Вероятно, это может быть связано с затрудненными условиями проникновения айсбергов с киями 40–70 м и более в Пухучанскую впадину при современном уровне моря (изолированный бассейн, восточная

экспозиция дна). Борозды на участке 4 обнаружены на больших глубинах (240–320 м), что говорит об их реликтовом характере. Остальные борозды располагаются на глубинах до 220 м и могли сформироваться как при современном уровне моря (0–5000 л. н.), так и при более низком уровне моря (в послеледниковое время) [12]. В случае, если в акваторию Пухучанской впадины при современном уровне моря действительно затруднено проникновение айсбергов с киями 40–70 м и более, то на глубине более 70 м здесь (участки 7 и 9) располагаются только реликтовые борозды, сформировавшиеся при уровне моря ниже современного не более чем на 60 м. Высокая максимальная глубина борозд (до 9.4 м) является неожиданным результатом. Однако не всегда просто судить о происхождении отрицательной формы рельефа только по попавшей в узкую полосу съемки части, и, как уже говорилось, они могут иметь смешанный генезис. За редким исключением, практически все борозды единичные, гребенки борозд встречаются крайне редко. Это говорит о преобладании однокилевых айсбергов в регионе. Представленные результаты говорят о высокой активности ледово-экскавационных процессов в юго-западной части Карского моря после окончания позднеплейстоценового оледенения, однако рельефообразующую роль именно современных айсбергов еще предстоит оценить.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству и участникам 52-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” за возможность проведения исследований.

Источники финансирования. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-20038, ГИН РАН, <https://rscf.ru/project/21-77-20038/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков В.Ю., Совершаев В.А. Геоморфология дна Карского моря // Динамика арктических побережий России / Под ред. В.И. Соломатина и др. М.: Географический факультет МГУ, 1998. С. 102–115.
2. Кокин О.В., Копя-Овдиенко Н.В., Цвецинский А.С. Микрорельеф дна Байдарацкой губы и его динамика // Вести газовой науки. 2013. № 3(14). С. 92–96.
3. Мазнев С.В., Кокин О.В., Баранская А.В., Огородов С.А. Изменение условий ледового выпахивания в морях Российской Арктики в связи с потеплением климата // Сб. материалов, представленных на Всероссийскую конференцию с международным участием XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования — в практику берегопользования. 2022. С. 136–138.

4. Миронюк С.Г., Иванова А.А. Микро- и мезорельеф гляциального шельфа Западно-Арктических морей в свете новых данных // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 2018. № 76. С. 41–58.
5. Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Издательство Московского университета, 2011. 173 с.
6. Рыбалко А.Е., Миронюк С.Г., Росляков А.Г. и др. Новые признаки покровного оледенения в Карском море: мегамасштабная ледниковая линейность в Восточно-Новоземельском желобе // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. Вып. 7. С. 175–181.
7. Baranskaya A.V., Khan N.S., Romanenko F.A. et al. A postglacial relative sea-level database for the Russian Arctic coast // Quaternary Science Reviews. 2018. V. 199. P. 188–205.
8. Barnes P.W., Rearic D.M., Reimnitz E. Ice gouging characteristics and processes // The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments / P.W. Barnes, D.M. Schell, E. Reimnitz (Eds.). Acad. Press Inc., Orlando, Florida, 1984. P. 185–212.
9. Irrgang A.M., Bendixen M., Farquharson L.M. et al. Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts // Nature Reviews Earth and Environment. 2022. V. 3. P. 39–54.
10. Kokin O., Maznev S., Arkhipov V. et al. The distribution of maximum ice scour sizes by sea depth at the seabed of the Barents and Kara Seas // Proceedings of the 27th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Glasgow: POAC23. 2023. P. 1–11.
11. Kokin O., Usyagina I., Meshcheriakov N. et al. Pb-210 Dating of Ice Scour in the Kara Sea // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. V. 11. P. 1404.
12. Maznev S.V., Kokin O.V., Arkhipov V.V., Baranskaya A.V. Modern and Relict Evidence of Iceberg Scouring at the Bottom of the Barents and Kara Seas // Oceanology. 2023. V. 63(1). P. 84–94.
13. Miroshnikov A.Y., Asadulin E.E., Komarov V.B. et al. Relief of the Kara Sea bottom and sediment sorption properties as pollution accumulation factors // Oceanology. 2021. V. 61(5). P. 714–726.
14. Montelli A., Dowdeswell J.A., Pirogova A., et al. Deep and extensive meltwater system beneath the former Eurasian Ice Sheet in the Kara Sea // Geology. 2020. V. 48(2). P. 179–183.
15. Nikiforov S.L., Lobkovskii L.I., Dmitrevskii N.N. et al. Expected geological and geomorphological risks along The Northern Sea Route // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 466(1). P. 75–77.
16. Nikiforov S.L., Sorokhtin N.O., Ananiev R.A. et al. Research in Barents and Kara Seas during cruise 52 of the R/V Akademik Nikolaj Strakhov // Oceanology. 2022. V. 62(3). P. 433–434.
17. Ogorodov S., Arkhipov V., Kokin O. et al. Ice effect on coast and seabed in Baydaratskaya Bay, Kara Sea // Geography, Environment, Sustainability. 2013. V. 6, 3. P. 32–50.
18. Ogorodov S.A., Arkhipov V.V., Baranskaya A.V., Kokin O.V., Romanov, A.O. The Influence of Climate Change on the Intensity of Ice Gouging of the Bottom by Hummocky Formations // Doklady Earth Sciences. 2018. V. 478(2). P. 228–231.
19. Polyak L., Forman S.L., Herlihy F.A. et al. Late Weichselian deglacial history of the Svyataya (Saint) Anna Trough, northern Kara Sea, Arctic Russia // Marine Geology. 1997. V. 143. P. 169–188.
20. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/index_v4.html

THE MORPHOMETRY OF ICE SCOURS IN THE SOUTH-WESTERN PART OF THE KARA SEA

S. V. Maznev^{a,b,*}, O. V. Kokin^{a,b}, V. V. Arkhipov^{a,b}, E. A. Moroz^a, A. P. Denisova^{a,b},
R. A. Ananiev^c, S. L. Nikiforov^c, N. O. Sorokhtin^c, S. V. Godetskiy^a

^a Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^c Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

* e-mail: svmaznev@gmail.com

The ice-gouging topography of the southwestern part of the Kara Sea bed is a result of the impact of icebergs and sea ice. During 52 cruise of the R/V *Akademik Nikolaj Strakhov* using a multibeam echo sounder we collected a representative data of key parameters of ice scours (location, orientation, depth, width) for the first time, which allows us to draw conclusions on a regional scale. We revealed regularities in the distribution of the ice scours both in space and in depth and their density in different parts of the seabed. It was revealed that the maximum dimensions of the ice scours decrease with the distance from the sources of iceberg calving from NW to SE. The orientation of the ice scours correlates with the main drift directions of the icebergs. Most of the ice scours are located at depths up to 220 m and could have formed both at modern and at lower sea level (in post-glacial time). We identified a high degree of the seabed transformation by ice-gouging processes in the southwestern part of the Kara Sea.

Keywords: ice-gouging topography, ice gouge, ploughmark, bottom topography, iceberg, seabed survey