

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 выпахивания.

Ключевые слова: ледово-экзарационный рельеф, ледовая борозда, пflugмарки, 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 выпахивания, также известные как ледово-экзарационные борозды или пflugмарки [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 выпахивания 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 выпахивания. 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 выпахивания. 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).

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 гондole, 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

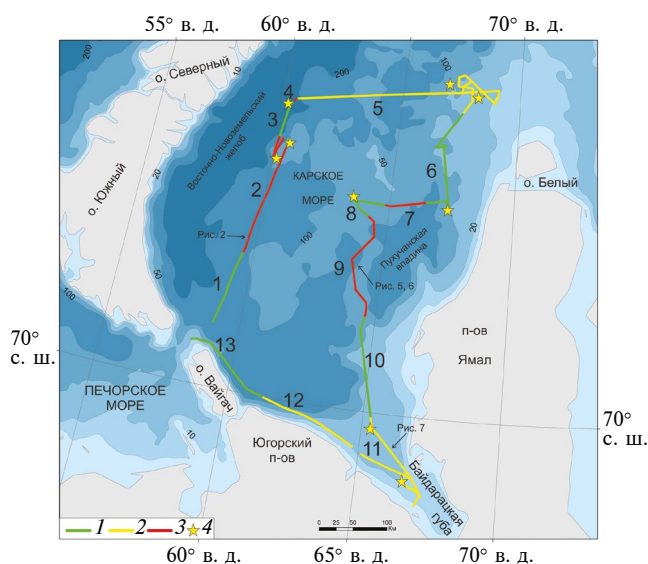


Рис. 1. Участки районирования распределения борозд выпахивания на дне Карского моря по маршруту 52-го рейса НИС “Академик Николай Страхов”: 1 – участки без борозд, 2 – участки с низкой плотностью борозд, 3 – участки с высокой плотностью борозд, 4 – участки полигональной съемки.

некоторых приборов (нарушенной стабилизации гирокомпаса 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 глубиной 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-

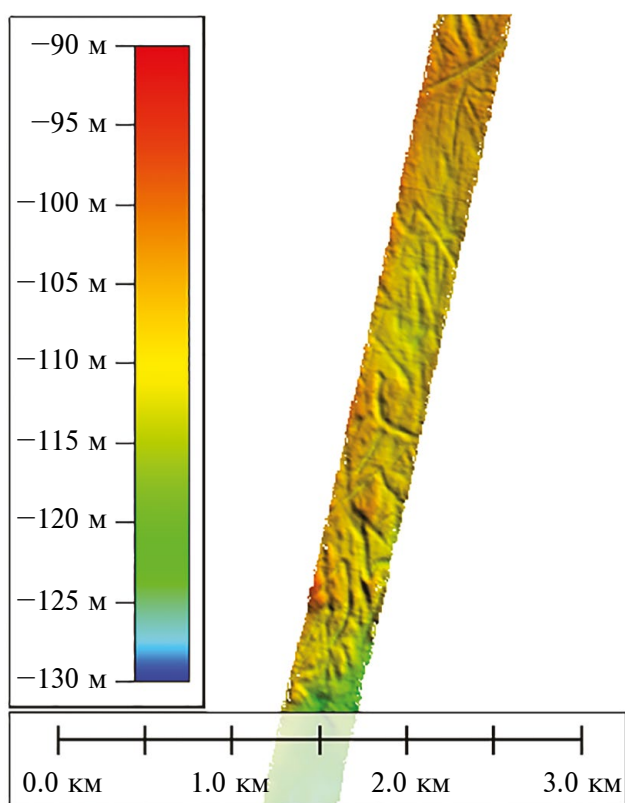


Рис. 2. Пример ЦМР с высокой плотностью борозд (участок 2, положение см. на рис. 1).

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 “изборужденности”) 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 выпахивания. 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 выпахивания. 546 из них относятся к крупным бороздам (глубиной более 1.0–1.5 м), по данным замеров глубины и ширины которых проведена ста-

статическая 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 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 выпахивания 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

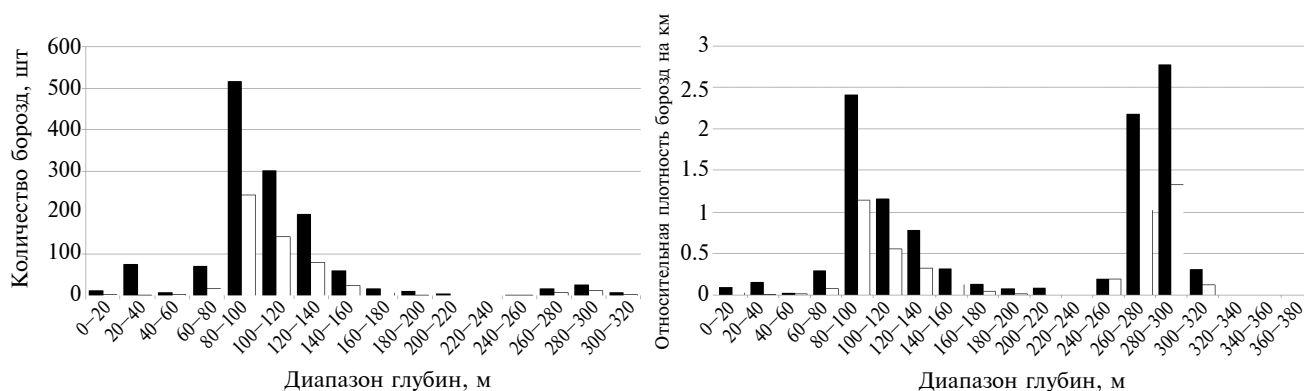


Рис. 3. Распределение (слева) и относительная плотность (справа) борозд выпахивания по 20-метровым диапазонам глубин. Черным – все борозды, белым – крупные борозды.

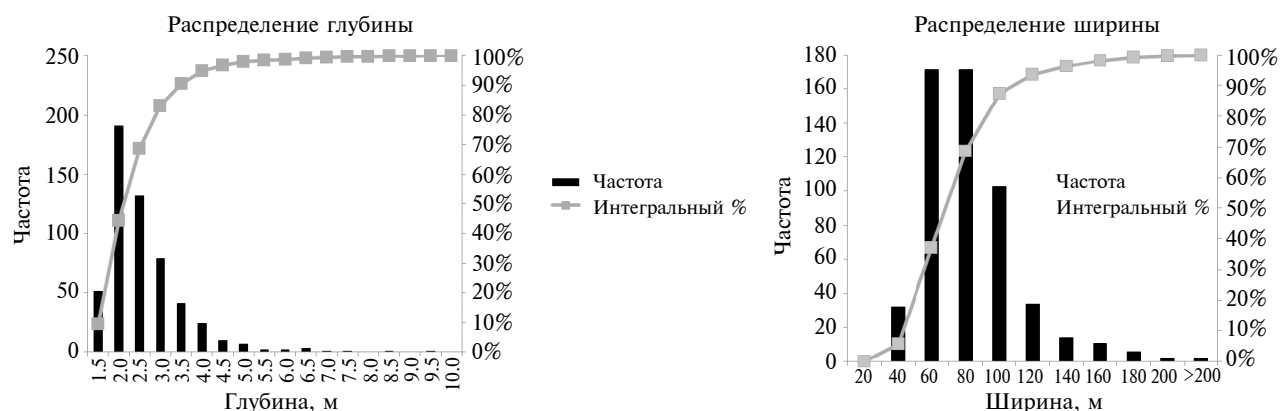


Рис. 4. Распределение значений глубины и ширины борозд выпашивания

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

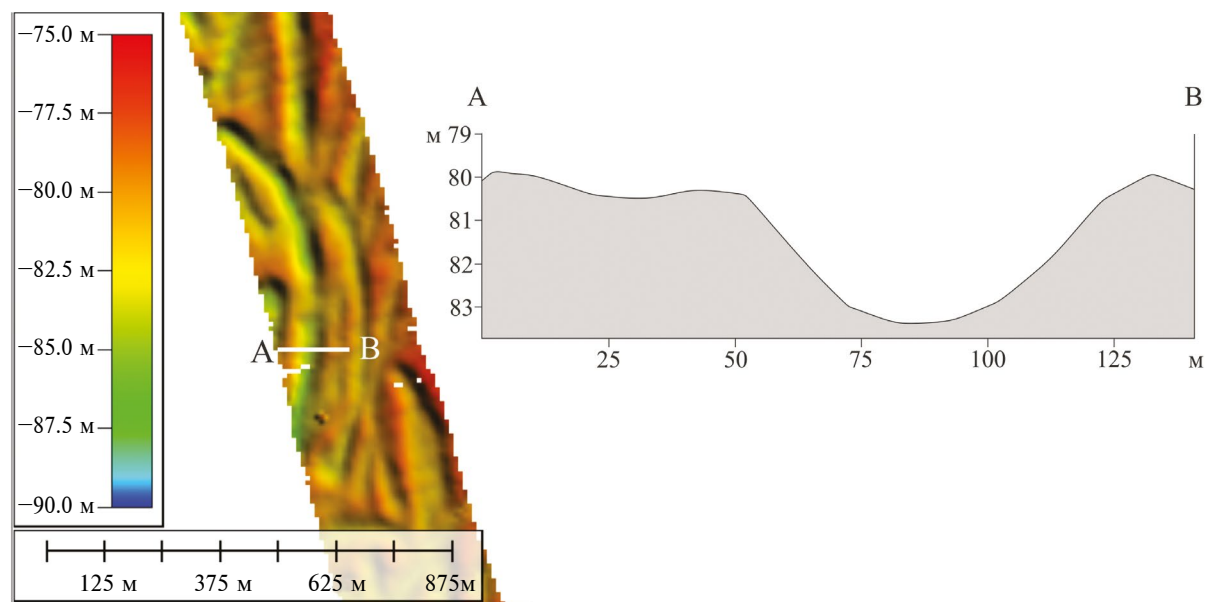


Рис. 5. Плановый вид и поперечный профиль через U-образную борозду к востоку от среднего Ямала (участок 9, положение см. на рис. 1).

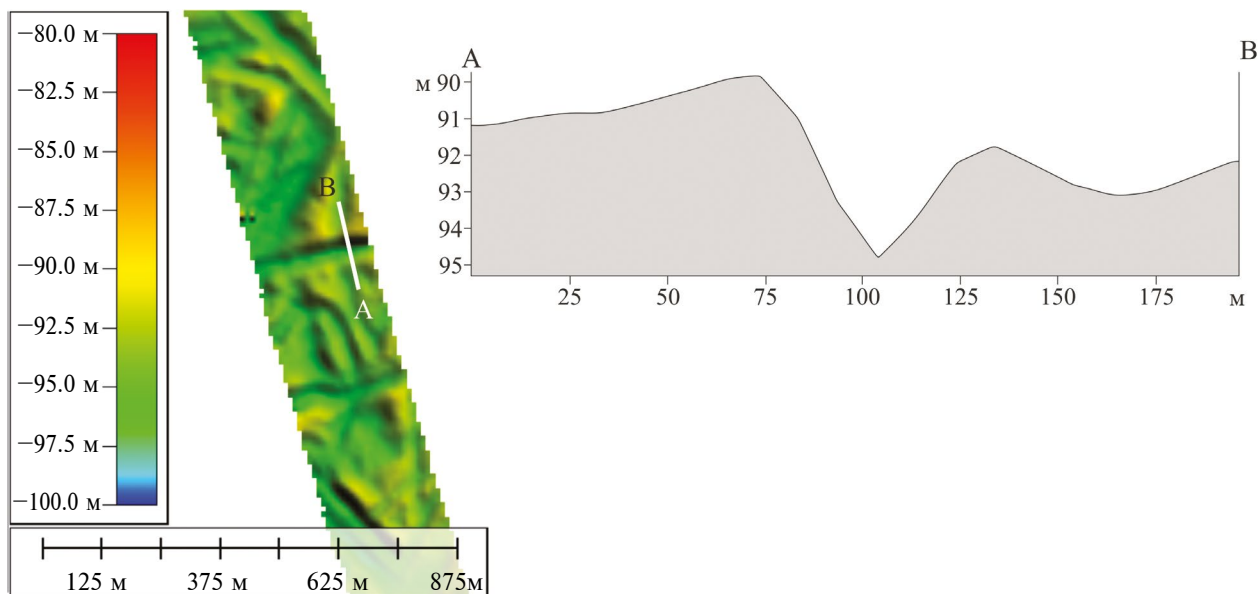


Рис. 6. Плановый вид и поперечный профиль через V-образную борозду к востоку от среднего Ямала (участок 9, положение см. на рис. 1).

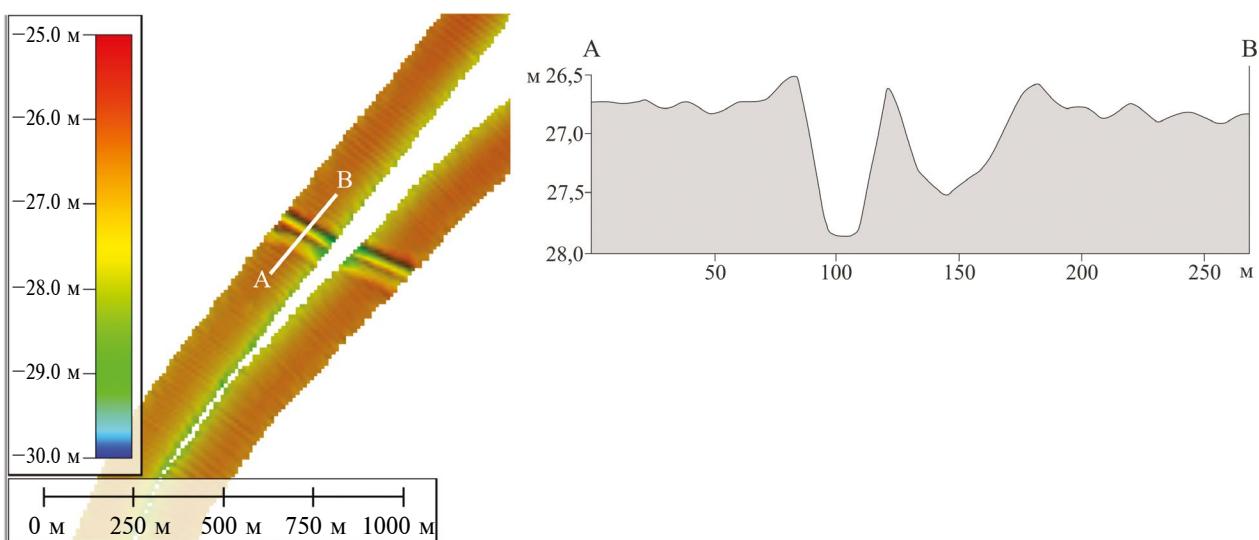


Рис. 7. Плановый вид гребенки из двух борозд в Байдарацкой губе (участок 11, положение см. на рис. 1), одна из которых (на профиле – слева) имеет ящикообразный поперечный профиль.

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

Основным направлением борозд выпашивания 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

морья) 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-

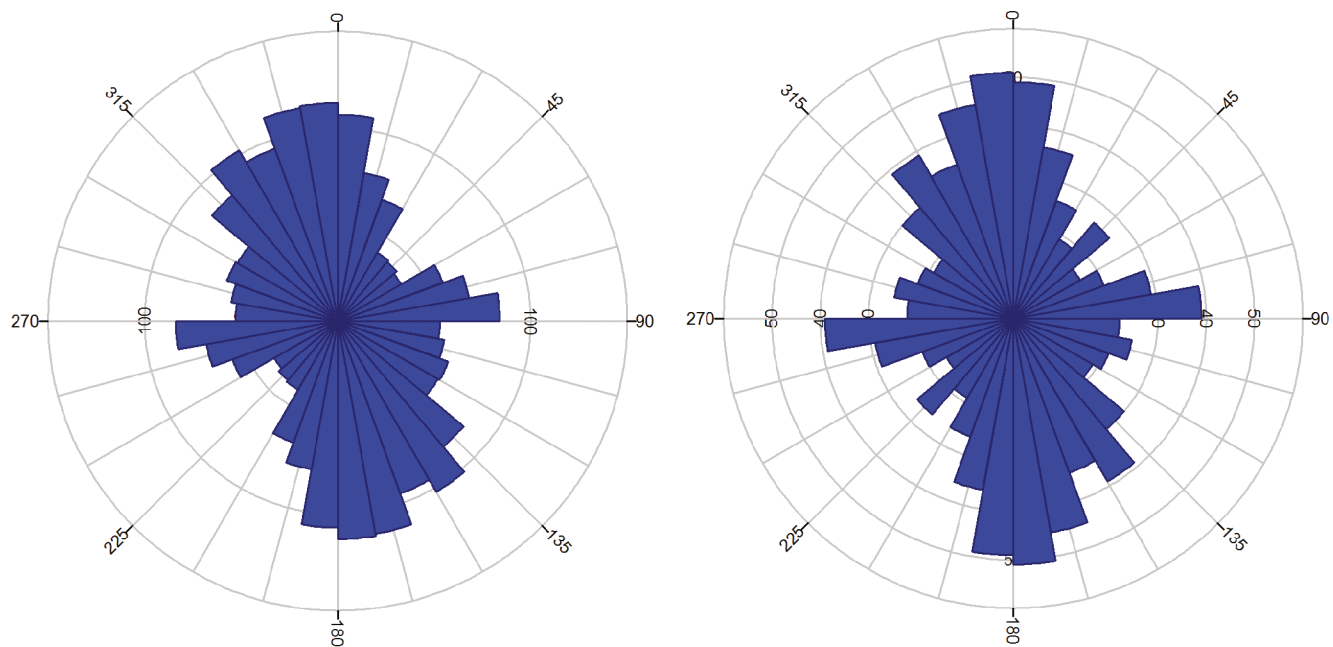


Рис. 8. Направления борозд выпашивания: слева – все борозды, справа – крупные борозды.

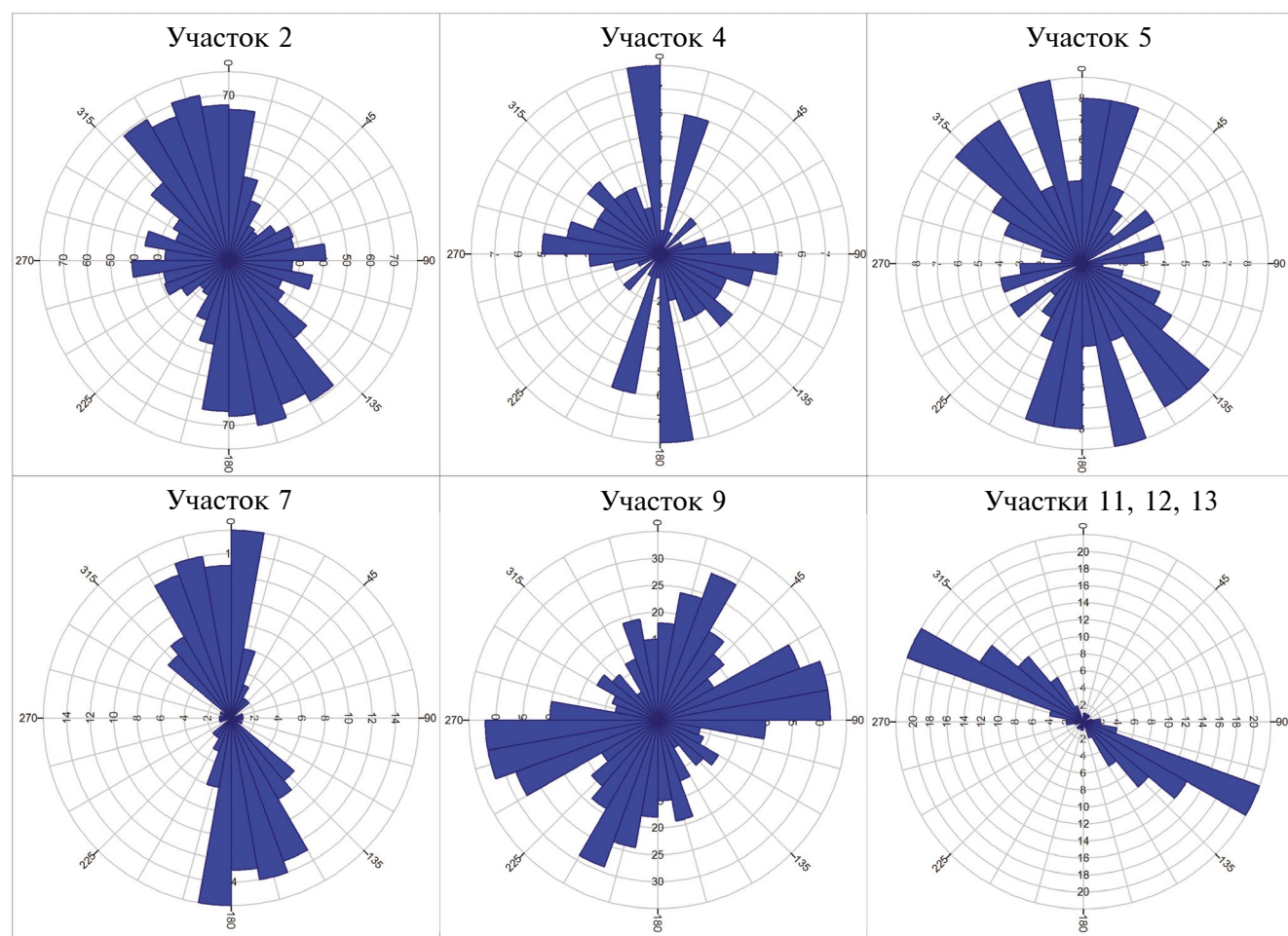


Рис. 9. Направление борозд по участкам.

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 меняющегося направления Восточно-Новоземельского и Ямальского течений. На участках в Байдарацкой губе и вдоль берега Югорского полуострова направления борозд соответствуют основному простиранию 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-экзарационных 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., Цвезинский 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

Morphometry of Ice Scours in the Southwestern 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, and 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*

Received July 16, 2023; revised September 12, 2023; accepted December 28, 2023

Abstract—The ice-gouging topography of bed of the southwestern Kara Sea is the result of the impact of icebergs and sea ice. During cruise 52 of the R/V *Akademik Nikolaj Strakhov* using a multibeam echo sounder, we collected representative data on the 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 spatial and temporal distribution of ice scours and their density in different parts of the seabed. It was revealed that the maximum dimensions of the ice scours decrease with distance from the sources of iceberg calving from NW to SE. The orientation of the ice scours correlates with the main drift directions of icebergs. Most of the ice scours are located at depths up to 220 m and could have formed both at the modern and lower sea levels (in postglacial time). We identified a high degree of seabed transformation by ice-gouging processes in the southwestern Kara Sea.

Keywords: ice-gouging topography, ice gouges, ploughmarks, bottom topography, icebergs, seabed survey

DOI: 10.1134/S0001437024700103

INTRODUCTION

Ice-gouging topography is formed via the interaction of drifting ice formations (consisting of sea ice, glacial ice, or a mix thereof) with the seabed [5, 8]. If contact with the seabed does not stop the drift of an ice formation, then specific shapes are formed as a result: scours, also known as ice gouges or plow marks [4]. When drift stops and the ice formation runs aground, depressions and pressure-ridge pits (stamukhi pits) are formed.

The study of the ice-gouging topography of the Arctic shelf is of interest both scientifically, to improve understanding of the impact of ice formations on the beds of Arctic seas, and practically. The Arctic region is considered one of the main future sources of hydrocarbons and has long been subjected to active economic development. Therefore, the study and better understanding of seabed ice gouging processes, especially against the backdrop of climate change, has now become particularly relevant [3]. Polar regions experience faster climate change than temperate latitudes [9, 20]. It is in these changing conditions that the active development of such inaccessible territories will continue. Iceberg and ice hazards are a natural risk in development of the Arctic shelf and Northern Sea Route (NSR), which adversely impacts the construction and operation of structures on the Barents–Kara shelf and maritime navigation along the NSR [15].

This article examines the ice-gouging topography studied during cruise 52 of the R/V *Akademik Nikolaj Strakhov* in 2021. The bulk of the materials were obtained in the southwestern Kara Sea (Fig. 1). Until now, the bottom topography of this region has been studied many times [1–6, 10–14, 16–19], which also mention the ice-gouging topography. However, the morphology of scours has not been studied in detail. The only exception is Baydaratskaya Bay, where studies have been carried out repeatedly (e.g., [2, 5, 17, 18] etc.), but this is only a small part of the considered region, where impact of sea ice on the bottom predominate, while in most of the southwestern Kara Sea, iceberg scours are widespread. Recent studies on the age of one of the largest gouges, at a depth of about 30 m in front of the inlet to Baydaratskaya Bay [11], indicate that it formed in 1810 ± 30 CE. Thus, it is suggested that the iceberg gouges in Baydaratskaya Bay were formed mainly in the 20th century, after the end of the Little Ice Age, when the size of icebergs decreased and they were able to penetrate the bay [11]. This article is the first to acquire a representative sample of measurements of the key parameters of ice gouges, which allows us to draw conclusions on a regional scale. When estimating the parameters of gouges, the most attention was paid to the maximum dimensions of the landforms, for the following reasons:

— The objective of the study was to determine the maximum possible incision depth and width of the

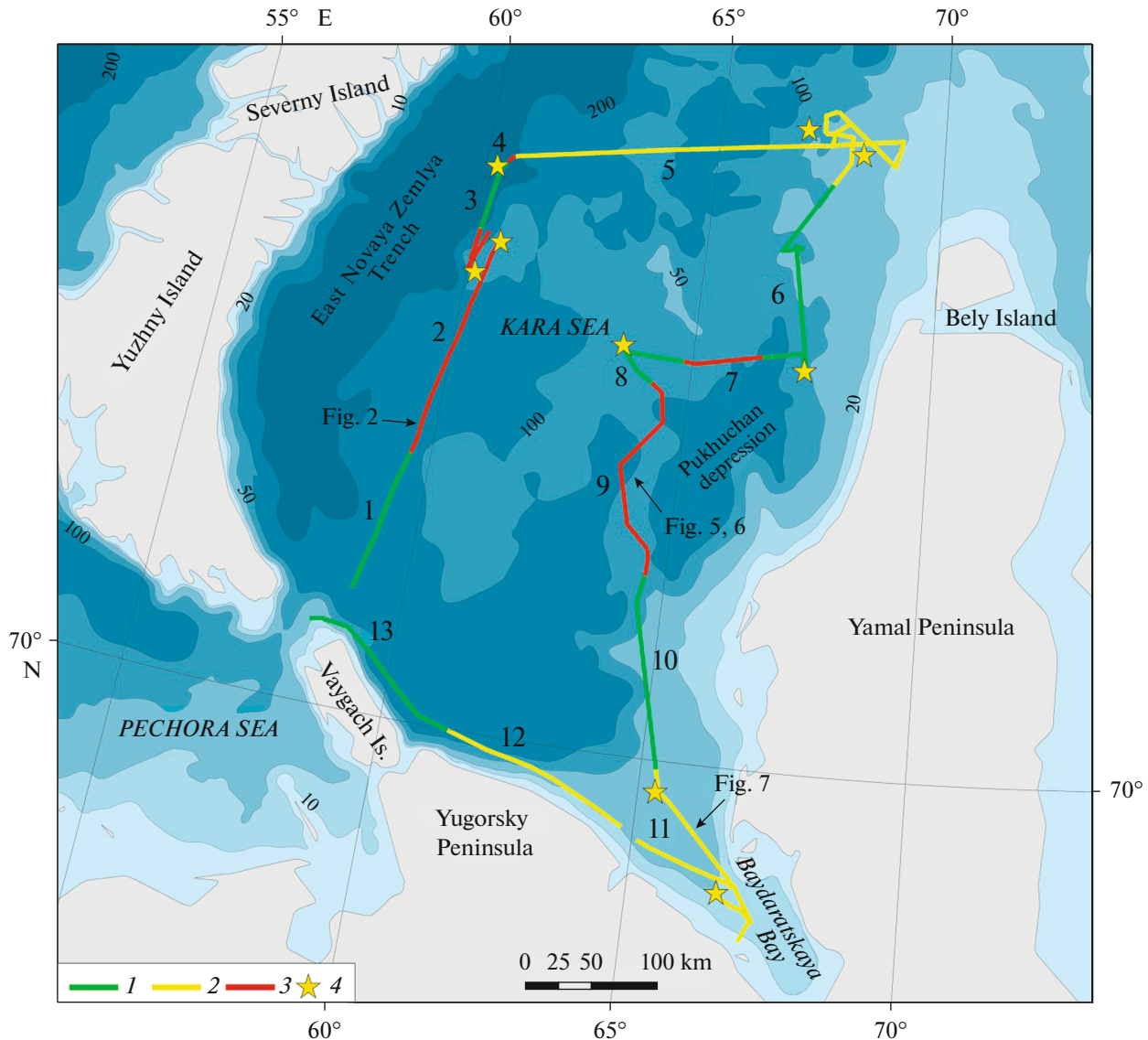


Fig. 1. Sectors for zoning distribution of scours on Kara Sea bed along route of cruise 52 of R/V *Akademik Nikolaj Strakhov*: (1) sectors without gouges; (2) sectors with low gouge density, (3) sectors with high gouge density; (4) polygon survey sectors.

gouge, which shows the largest possible dimensions of the ice formations involved in the process (the so-called engineering approach).

— Determining the average width and depth is difficult, because it requires processing of all gouges, including the smallest. Establishing their genesis and measurement itself are difficult given the available resolution and scale of study.

The obtained quantitative estimates of the spatial distribution patterns and morphology of the ice-gouging topography, depending on the external conditions, can be used when planning an economic development strategy for the shelf and recommendations to designers on improving engineering solutions for the construction of various infrastructure on the shelf (pipelines, drilling and production platforms, etc.).

MATERIALS AND METHODS

The main equipment for surveying the bottom topography on the cruise 52 of the R/V *Akademik Nikolaj Strakhov* [16] was the ship's RESON standard hydroacoustic seabed mapping system (Denmark), which includes:

- the SeaBat software and hardware complex, with SeaBat 8111 (shallow-water) and SeaBat 7150 (deep-water) multibeam echo sounders;
- GPS, motion sensors, and a gyrocompass combined in the Applanix POS-MV device;
- an SVP-70 sound speed sensor on the echo sounder arrays;
- the PDS2000 software package for data acquisition and processing;
- an EdgeTech 3300 high-frequency profiler (USA).

The transmitting and receiving arrays of the multi-beam echo sounders and the profiler were installed in a gondola welded to the keel of the vessel.

The survey results were saved by the software in .log format, followed by processing. Prior to the survey, the operator configured the software filters for depth and signal quality (depending on the expected depths in the sector); sometimes additional filters were configured, such as an angular filter, a filter that applies moving average, etc. The sound speed parameters in the aquatic environment, measured at stations during the voyage, were set. Then, after the data were saved on media, the materials were manually postprocessed by the operator. Rays whose data looked erroneous or inaccurate were screened and eliminated by an expert method. In some cases, for incorrect operation of some devices (disrupted stabilization of the gyrocompass in stormy weather, etc.) or other software errors in the data, at the stage of converting the DEM from the primary format to the .asc format, software settings were used to correct curvatures, residuals, etc. To compile the resulting DEM, suitable for processing and deciphering gouges, the resolution settings (DEMs in this case were compiled with a pixel size of 10×10 m), the data averaging method, and display settings were set from the source file. Thus, the resulting DEM (Fig. 2) had a resolution of 10 m in plan view and 0.1–1.0 m in depth, which is highly dependent on weather conditions.

In total, during the work on the initial data, about 4460 km or 2400 nautical miles of Kara Sea bed survey at depths from 10 to 380 m were processed. The width of the survey band depended on depth, from 50 to 1200 m. Based on the nature of the data, the survey was divided into areal (polygons) and transit (along a single leg), connecting the polygons. All survey results within the study area were divided into 30 segments, of which 13 were polygons and 17 were transits. The length of the transit survey, except for work at the polygons, was about 2500 km (1350 nautical miles).

For interpretation in the ArcMap 10.2 environment, the following sequence of actions was used. A shapefile (.shp) was created with an attribute Table 1 with columns: number, width, depth, and sea depth range. For each of the survey segments, sequential inspection of the DEM was carried out for the presence of ice-gouge landforms. The selected shapes were entered into the created shapefile. After this, the widths and depths of large forms were measured. Initially, all forms with a depth greater than 1.0 m were classified as large, but during the interpretation process, it was revealed that they made up more than 60% of all gouges, and the criterion was raised to 1.5 m. In measuring the width and depth, the following technique was used. The shape was visually inspected on the DEM, and characteristic locations were selected for constructing transverse profiles. Depending on the length of the gouge segment within the survey, from 2

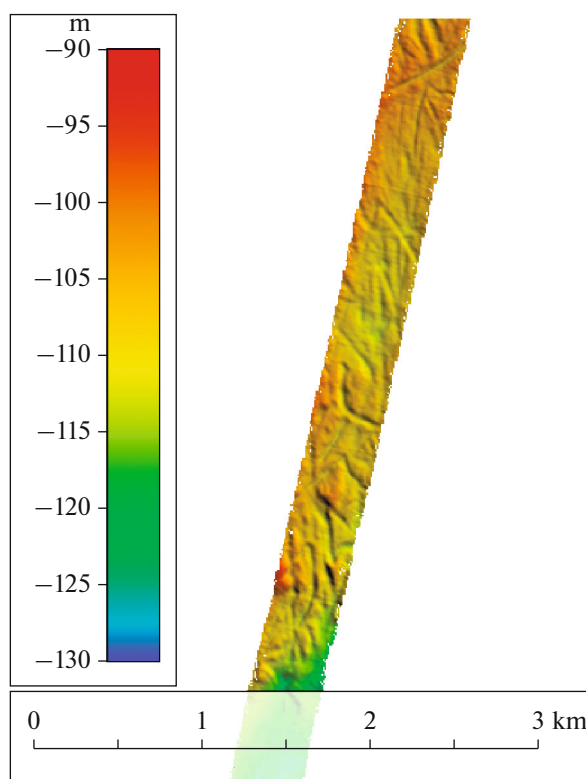


Fig. 2. Example of DEM with high gouge density (sector 2; for position, see Fig. 1).

to 15–20 transverse profiles were constructed in order to identify the deepest spots in the gouge. Not the average, but the maximum depth was entered into the attribute table. The depth was determined as follows. Since the main goal was to identify the maximum incision relative to the background surface, above which the ridges of the gouge heaps rise, framing the gouges (embankment sides), the corresponding levels were first determined, then measurements were taken. In most cases, though, the side ridges are not pronounced, and determining the level of the background surface is difficult due to the limited width of the survey band, various forms of bottom topography (moraine hills, sedimentary ridges, subglacial channels, etc.) or the irregular shape of the gouge itself. The surface often has a large number of irregularities (especially in the case of intense “gouging”) or it has a constant slope. In this case, to determine the depth, the lowest characteristic inflections of the topography were selected: the edges of gouges or the tops of intergouge ridges. This makes it possible to estimate the apparent depth of ice forms in cases where there is no clear level of the background surface and pronounced side ridges.

After determining the width from the transverse profiles, the width was verified using the DEM. In some cases, the width determined from the DEM differed from that determined from the transverse profiles, because the gouge may be embedded in a larger

Table 1. Characteristics of survey sectors of Kara Sea bed

No.	Geographical location	Sea depth, m	Average/ maximum gouge depth, m	Average/ maximum gouge width, m	Predominant orientation	Gouge density, gouges/km	Percentage of large gouges, %
1	Western slope of central uplift, east of southern part of Yuzhny Island of Novaya Zemlya, northeast of Kara Strait	125–200	–	–	–	0	–
2	Western slope of central uplift, east of middle and northern parts of Yuzhny Island of Novaya Zemlya	60–220	$\frac{2.5}{9.4}$	$\frac{81.5}{476}$	NNW–SSE	3.2	42
3	Eastern wall of East Novaya Zemlya Trench, east of Matochkin Shar Strait	200–350	–	–	–	0	–
4	Eastern side of East Novaya Zemlya Trench east of southern part of Severny Island of Novaya Zemlya	240–320	$\frac{2.2}{4.6}$	$\frac{54.3}{102}$	N–S	6.4	47
5	From East Novaya Zemlya Trench to shallows to north of Bely Island	15–280	$\frac{2.9}{7.0}$	$\frac{70.1}{171.0}$	NNW–SSE	0.26	43
6	West from Bely Island	50–60	–	–	–	0	–
7	Northern slope of Pukhuchan depression, west of northern Yamal	60–110	$\frac{2.2}{5.9}$	$\frac{74.5}{148.0}$	N–S	1.5	31
8	West of northern Yamal	40–70	–	–	–	0	–
9	Western slope of Pukhuchan depression, west of middle Yamal	60–140	$\frac{2.3}{4.6}$	$\frac{64.3}{130.0}$	NE–SW	3.9	49
10	West of Sharapovy Koshki Islands	35–100	–	–	–	0	–
11	Baydaratskaya Bay and adjacent southern areas	10–40	$\frac{2.0}{2.5}$	$\frac{40.8}{55.0}$	NW–SE	0.5	6
12	Along Yugorsky Peninsula	25–200	–	–	NW–SE	0.05	0
13	Along Vaygach Island	75–200	–	–	W–E	<0.01	0

negative landform, and their relationship is better observed in plan view. The attribute table included the width and depth from one section (determined in some way), and not the maximum, determined on different sections. This was done in order to determine the depth to width ratio without distortion. The depth of the forms took priority. After constructing the transverse profiles, corrections were made: some gouges were unpronounced or were recognized as erroneously identified, while others demonstrated a nongouge genesis and were discarded from the sample. When viewing the DEM in detail, in some cases, at this stage, additional gouges were identified that were missed at the previous stage.

As a result, an interval classification of the depths along the survey route where the scours were located was compiled. The DEMs were sequentially divided into 20-m intervals, the values of which were assigned to gouges falling within them, then entered into the attribute table. Using a specially written script for the Python console in the QGIS 3.6 environment, the directions (orientation) of the gouges were determined, calculated as the direction of the line connecting the beginning and end of the interpreted part of the gouge, consisting of several segments, or as the direction of the gouge consisting of one segment. This corresponds to the resulting motion vector of the ice formation. The values are adjusted to the segment from

0° to 180° and added to the attribute table. The lengths of the gouges were not determined, since most did not fall entirely within the survey band.

At the last stage, the entire route was zoned by gouge density, and a number of sectors were identified. Information about gouges belonging to a particular sector was entered into the attribute table. Then, the data from the attribute table were downloaded and statistically processed in MS Excel. General descriptive statistics were obtained both for the entire sample of ice gouges, as well as statistics for each selected area (sector) individually.

RESULTS AND DISCUSSION

Based on the results of interpreting the materials from Kara Sea bed surveys on cruise 52 of the R/V *Akademik Nikolaj Strakhov*, 1319 gouges were revealed, 546 of which are attributed to large gouges (more than 1.0–1.5 m deep); statistical processing was based on their depth and width measurements. Thus, large gouges make up about 41% of all interpreted gouges in the Kara Sea. Taking into account the polygon surveys, the gouge density was about 1 gouge per 3.3 km of survey (0.3 gouges/km). However, such an assessment may not be entirely objective, since the polygons were chosen to survey certain objects, e.g., underwater canyons, where there were no gouges. At the same time, in some polygons, there were quite a lot of gouges that would not have been captured during normal transit surveying. Ignoring polygons, the gouge density was about 1 gouge per 1.5 km of transit survey (0.67 gouges/km). Apparently, the actual gouge density is somewhere between these values, about 1 gouge per 2.1 km of survey (0.5 gouges/km). The density of gouges is uneven and varies greatly depending on the specific sector. The summary table presents the statistical parameters of the gouges for the Kara Sea bed survey sectors. Average values were calculated only from the measured values of large gouges, not from all interpreted gouges. The maximum gouge depths and widths in the table can be attributed to different gouges in the sector.

The scours are distributed across the selected sectors as follows:

— In sector 1 (Fig. 1) along the southern part of the Southern Island of Novaya Zemlya at depths of 125–200 m there are no gouges.

— In the next, sector 2, located along the middle part of Yuzhny Island of Novaya Zemlya, a high gouge density is observed: about 1 gouge for every 310 m of survey (3.2 gouges/km). The depth in the sector averages about 120 m (from 60 to 220 m). There are 297 large gouges in the sector, i.e., about 1 gouge per 0.7 km (1.4 gouges/km). However, they are not found on two segments with depths of 150–200 m. The maximum gouge density in the northern part of the sector reaches 5.2 gouges/km.

— In sector 3 at depths of 200–350 m, there are no gouges.

— Sector 4 is confined to relatively large depths (240–320 m); however, it is attributed to sectors with an increased gouge density. On average, 1 gouge occurs every 150 m (6.4 gouges/km), while almost half the gouges are large; on average, 1 large gouge occurs every 330 m (3.0 gouges/km).

— Sector 5 has a low concentration of gouges, 1 gouge on average per 3.8 km (0.26 gouges/km). The density of large gouges is also lower, about 1 gouge per 9 km (0.1 gouges/km). The sector contains a wide variety of depths (from 15 to 280 m), but the greatest gouge density is confined to depths of 30–40 m.

— Sector 6 with depths of 50–60 m west of Bely Island has no gouges.

— Then, in small sector 7, 55 km long with depths of 60–110 m, a high gouge density is observed, about 1 gouge per 650 m of survey (1.5 gouges/km). Large gouges occur every 2 km (0.5 gouges/km).

— In sector 8 at depths of 40–70 m, there are no gouges.

— In sector 9 with depths of 60–140 m, many gouges have been interpreted, and the maximum density is observed at depths of 80–110 m in the middle of the sector, reaching 1 gouge per 250 m of survey (3.9 gouges/km). At the beginning and end of the sector, the density is about 1 gouge per 1.4 km (0.7 gouges/km). The maximum density of large gouges in the sector is about 1 gouge per 450 m (2.2 gouges/km).

— Sector 10 with depths of 35–100 m has no gouges.

— In Baydaratskaya Bay (sector 11), the gouges are distributed unevenly; there are sectors with depths of 20–25 m without any gouges at all. At the inlet to the bay, gouges were found at depths of 25–32 m; the density is about 1 per 3 km (0.3 gouges/km). The maximum density is observed in the central part of the bay, about 1 gouge per 2 km of survey (0.5 gouges/km). Only four large gouges were recorded in Baydaratskaya Bay.

— Sector 12 along the northern coast of the Yugorsky Peninsula has an extremely low concentration of gouges, about 1 per 21.5 km (0.05 gouges/km). The depths here gradually increase from southeast to northwest, from 25 to 200 m.

— In sector 13 along the Vaygach Island with depths of 75–200 m, one gouge was recorded, located at the end of the sector, east of the Kara Strait. However, the sector in the diagram is marked as having no gouges, since there are none along almost its entire length; the only gouge is not large. Large gouges in the last sectors were not found at all.

As already mentioned, large gouges make up about 41% of all gouges. In the central and northern parts of the studied area (sectors 2, 4, 5, 7, 9), large gouges account for 42–49%; only in sector 7 is the concentra-

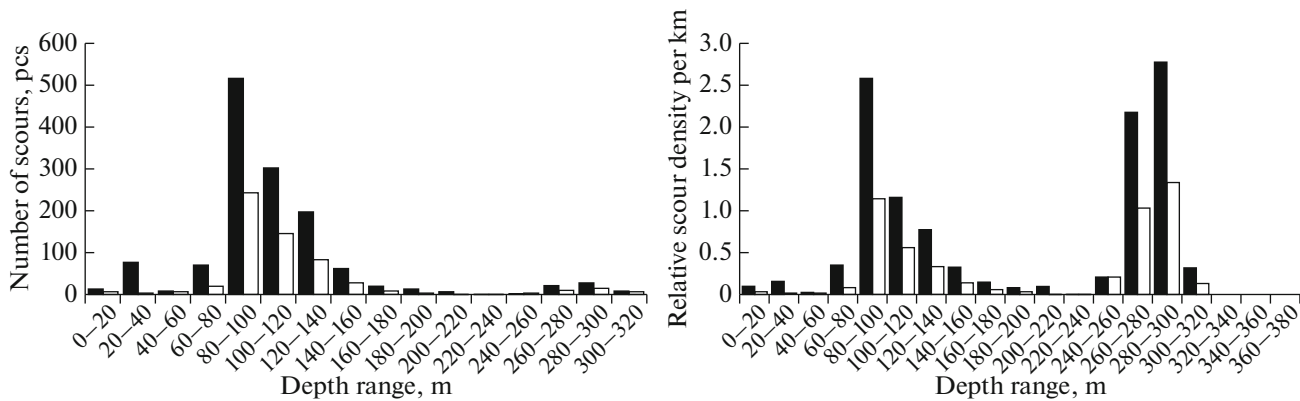


Fig. 3. Distribution (left) and relative density (right) of scours across 20 m depth intervals. Black, all gouges; white, large gouges.

tion lower, 31%. In the southern part (sectors 11–13), there are practically no large gouges—only four per three sectors, or 6%.

Thus, if we consider the studied southwestern Kara Sea, the highest gouge density is confined to its central part. We consider the studied gouges as traces of the impact of icebergs on the bottom, not of hummocky formations consisting of sea ice. The main reason is the depth at which they are found. The maximum depth of influence of modern ice hummock formations on the bottom does not exceed 26 m [18]; thus, even taking into account changes in sea level [7], in most sectors, only icebergs can interact with the bottom [12]. Almost all of the studied sectors are located far from the coastal zone, where hummocks are less common. The only exceptions are the gouges in Baydaratskaya Bay, but based on a number of morphological characteristics (flat seabed, orientation, etc.), large gouges here can also be more likely attributed to iceberg gouges.

Sectors with a high concentration of gouges are interspersed with sectors with none at all. This may be due to the directions of iceberg drift, which rarely fall into the southern part of the study area and pass over the northern part without touching the bottom at great depths, as well as to local conditions. In the western part of the route, almost no gouges are found at depths greater than 125 m, with the highest density occurring at depths of 90–120 m. In the eastern part, gouges are not found at depths of 40–70 m, with the highest density occurring at depths of 70–125 m. In Baydaratskaya Bay, the studied gouges are confined to depths of 10–40 m. The distribution of gouges over 20-m depth intervals in the studied area is shown in Fig. 3. A small peak is observed at depths of 20–40 m and belongs to the southeastern part of the studied area (Baydaratskaya Bay and adjacent parts of the Kara Sea). Most of the gouges are located at depths of 60–160 m; this is 93% of large gouges and 87% of all gouges. At the same time, 45% of large and 39% of all gouges fall into the depth interval 80–100 m. When calculating the rel-

ative gouges density of per km of survey, the main peak is also confined to the interval of 80–100 m (Fig. 3). The additional peak at depths of 260–300 m is explained by the short extent of sectors with such depths, which accounted for a significant number of gouges. The average depth at which the gouges were found is 108 m. The depth distribution of the gouges is close to lognormal (Fig. 4). The relationships between the depth at which the gouges are found and their morphometric parameters are complex and are described in detail in [10]. In general, they can be characterized as an increase in the size of gouges with depth during historical changes in sea level.

Across the entire studied water area of the Kara Sea, the depth of large gouges for which measurements were taken reaches 9.4 m. At the same time, the average depth is 2.4 m (median value 2.2 m); the depths of 97% of the gouges do not exceed 5 m, and 50% of gouges have depths of up to 2 m. Only 11 gouges have depths greater than 5 m. Presumably, some of them do not have a purely gouge-related origin, but were carved out by subsequent erosion processes, which could have increased their original depth. The deepest gouges are confined to the area near Novaya Zemlya (sector 2), but deep (up to 7.4 m) gouges are also found in the northern part of the studied area (sector 5). In the last sector, the greatest average depth among all is observed, 2.9 m. The least deep gouges are confined to Baydaratskaya Bay and the adjacent southern Kara Sea, with the greatest depth here reaching 2.5 m, 2.0 m on average. This distribution can be explained by the proximity of sectors 2 and 5 to iceberg formation regions, their location along the drift path [12], and the distance from them to Baydaratskaya Bay.

The width of the gouges ranges from 23 to 476 m and averages 74 m (median 68 m). Ninety-eight percent of the gouges are less than 160 m wide, and 87% are less than 100 m wide. In the area near Novaya Zemlya, the gouges are not only the deepest, but also the widest. The average width is 81.5 m, while in the other sectors, it is at least 7 m less. In the relatively

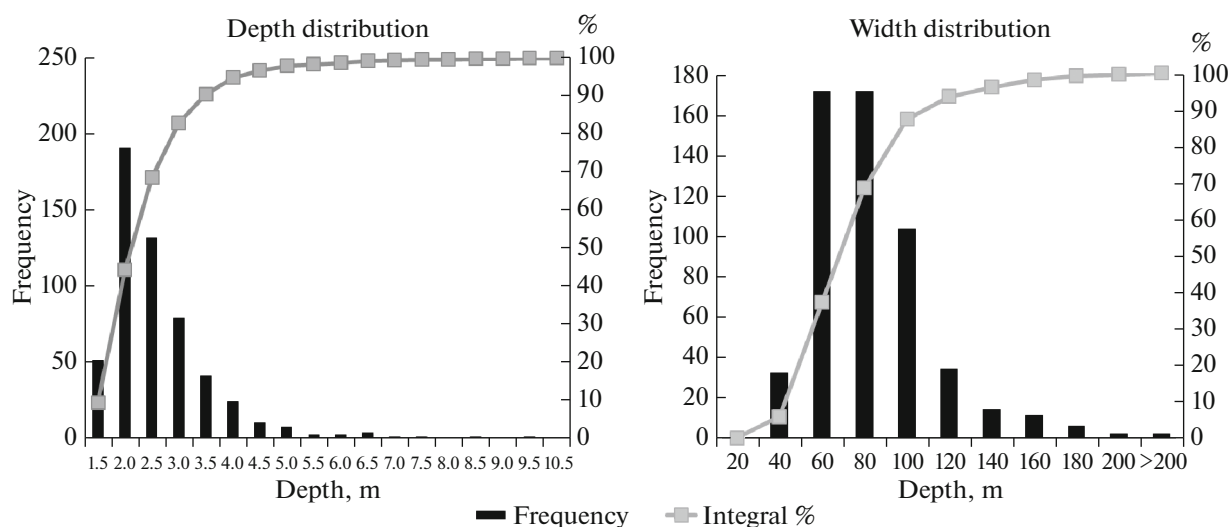


Fig. 4. Distribution of depth and width values of scours.

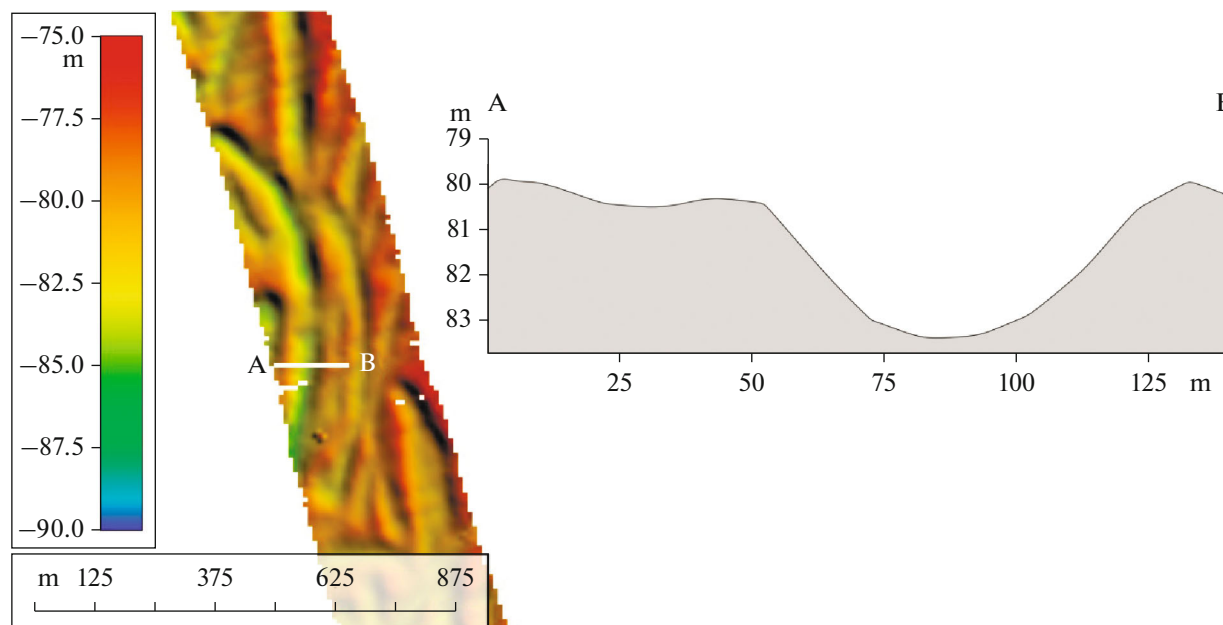


Fig. 5. Plan view and cross-section through U-shaped gouge east of middle Yamal (sector 9; for position, see Fig. 1).

deep-water sector, four gouges have a small width, up to 102 m (on average 54 m). In the southern part of the studied area, the gouges are the least wide, up to 55 m (on average 41 m). The distribution of values is close to lognormal (Fig. 4). The ratio of gouge depth to width does not show any relationship between these quantities. It ranges from 1 : 8 to 1 : 207. On average, the gouge depth is related to its width as 1 : 33; 97% fits into a ratio of 1 : 10–1 : 70.

The cross-sections of gouges are U- (Fig. 5) or V-shaped (Fig. 6), and less frequently, box- (Fig. 7) or W-shaped. Single gouges predominate; combs of par-

allel scours (or gouge multiplets) are rare. The lateral ridges are most often not pronounced, but there are gouges with ridges more than 1 m high (Fig. 7).

The main direction of scours in the southwestern Kara Sea is submeridional, and this is especially pronounced for large gouges (Fig. 8). Another pronounced peak in the directions of gouges is sublatitudinal. However, these directions are not the overwhelming majority; many gouges have intermediate azimuths, and, in general, are distributed fairly evenly in this component. No relationship was found between the direction of the gouges and their statistical param-

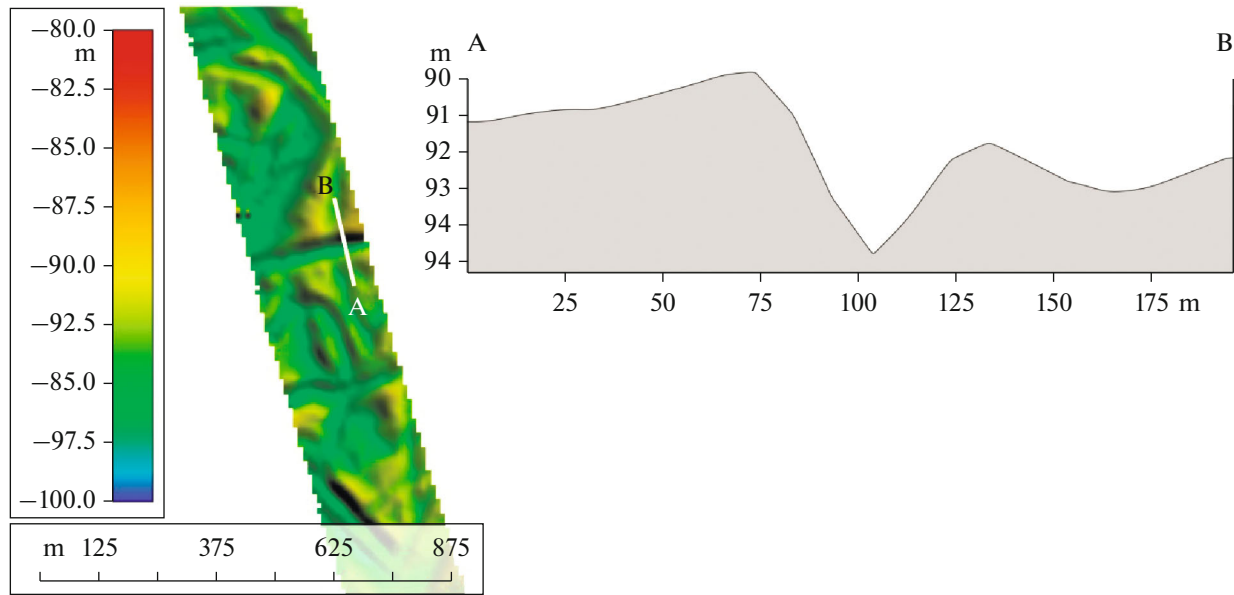


Fig. 6. Plan view and cross-section through V-shaped gouge east of middle Yamal (sector 9; for position, see Fig. 1).

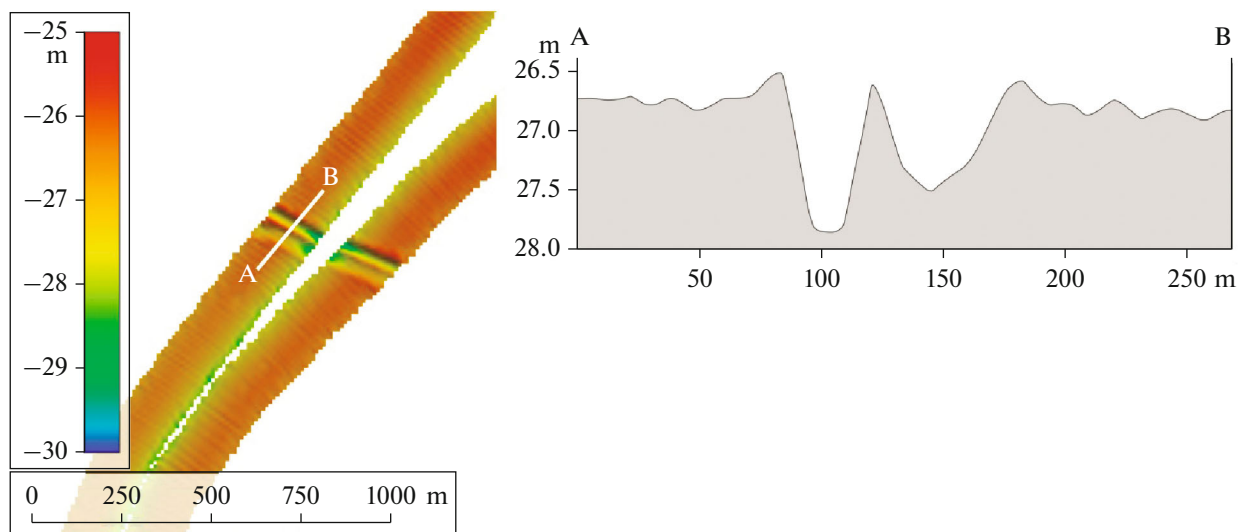


Fig. 7. Plan view of double-scoured comb in Baydaratskaya Bay (sector 11; for position, see Fig. 1), one of which (left on profile) has box-shaped transverse profile.

eters (depth, width, and sea depth). As a rule, the gouges have several segments with different directions; less frequently, they bend gradually. A significant number of the gouges are rectilinear. The gouges change direction at an angle from several to 150° – 160° .

However, in different sectors (different areas) the directions of gouges differ markedly (Fig. 9). Thus, in sector 2 near Novaya Zemlya, they have a predominant NNW–SSE orientation. In neighboring sector 4, the N–S orientation is complemented by a significant NW–SE direction in terms of the number of gouges, while the NNW–SSE direction, significantly less so.

All these directions approximately correspond to the azimuths of the sectors with respect to the main sources of iceberg formation. In sector 5, there is also the NNE–SSW directions. Gouges with this direction can be left by icebergs entrained by the Yamal Current, which in this area has approximately the same orientation. The orientation of the gouges in sector 7 is submeridional, with a slight slope to the NNW–SSE, similar to sector 2. In this sector, the gouges are most clearly oriented in one direction. Given the geographical location of the sector and the orientation of the gouges in neighboring sectors, this pattern does not

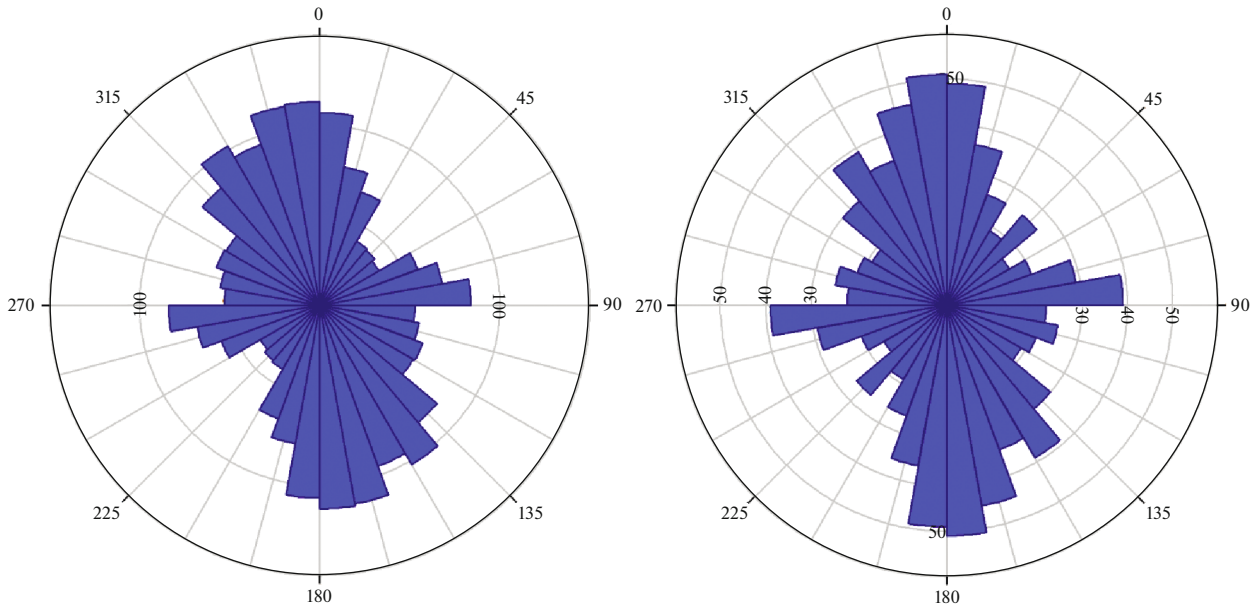


Fig. 8. Directions of scours: left, all gouges; right, large gouges.

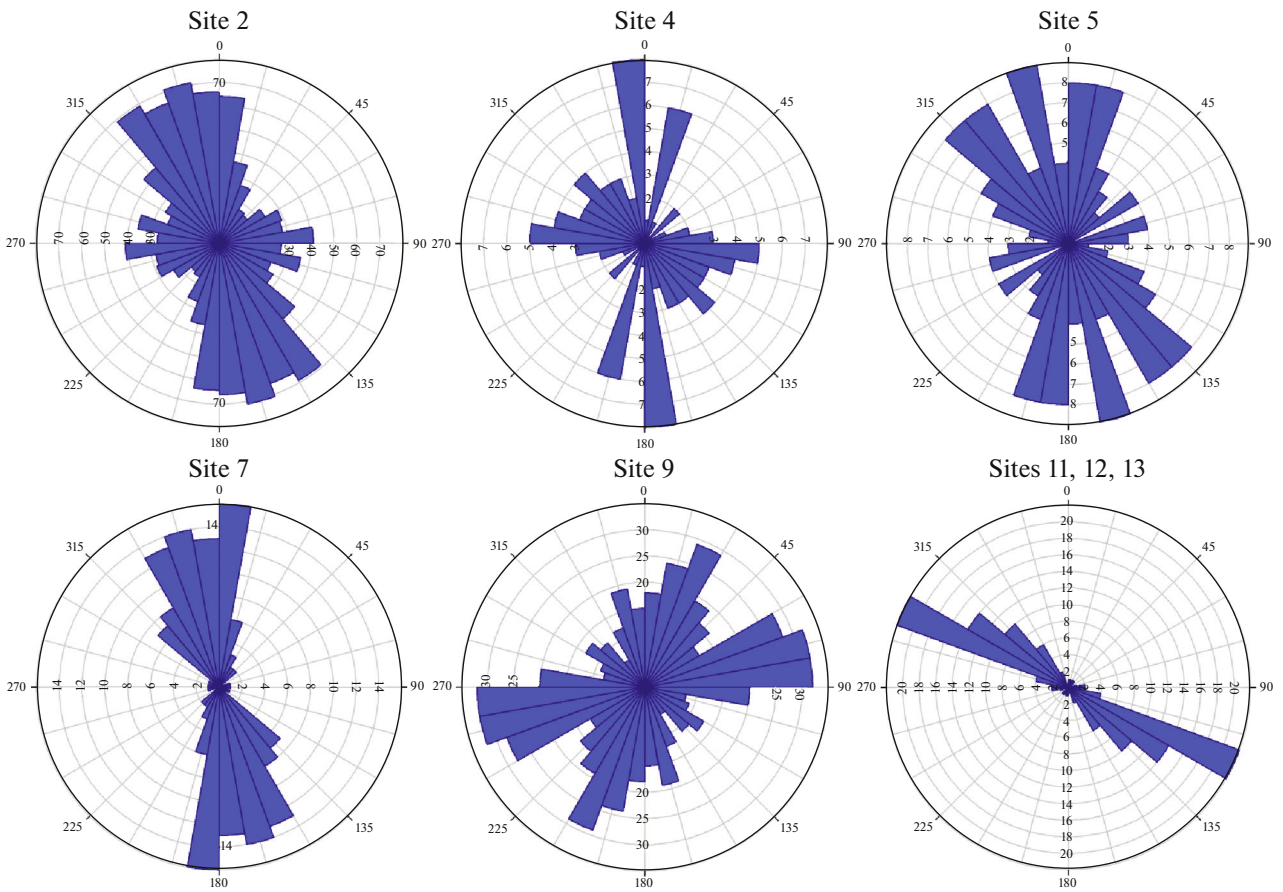


Fig. 9. Direction of gouges by sector.

seem entirely expected. Sector 9 shows two main directions of gouges: NNW–SE and WNW–SW. In this sector there was a probably change in the directions of iceberg drift, associated with the changing direction of the East Novaya Zemlya and Yamal currents that meet here. In the sectors in Baydaratskaya Bay and along the coast of the Yugorsky Peninsula, the directions of gouges correspond to the main orientation of the bay and the coastline.

CONCLUSIONS

Based on the results of the study, the following conclusions can be drawn. The maximum dimensions of the gouges decrease with distance from the sources of iceberg formation from NW to SE. Except for the sector opposite northern Yamal, the orientation of gouges generally correlates with the main directions of iceberg drift. The average depth of scours across the sectors of the studied area of the Kara Sea varies insignificantly, from 2.0 to 2.9 m (variation coefficient 0.40), just like the average width, from 41 to 82 m (variation coefficient 0.44). The percentage of large gouges also varies insignificantly and is slightly less in the northern than in the central part (31% versus 42–49%), and significantly less in the southern part (6%). If the absence of gouges at depths of 125–350 m (sectors 1, 3 and 13) due to too great depths and at depths of 35–125 m in the southern part (sectors 10, 13) due to remoteness is expected, then the absence of gouges at depths 40–70 m in the central part of the studied area (sector 8) can be considered unexpected. It has also not been fully explained that such sectors are adjacent to high-density sectors without any pronounced transition sectors of medium density. This may likely be due to the difficult conditions for icebergs with keels of 40–70 m or more to penetrate the Pukhachan depression at the modern sea level (isolated basin, eastern exposure of the seabed). The gouges in sector 4 were found at great depths (240–320 m), which indicates their relict nature. The remaining gouges are located at depths of up to 220 m and could have formed both at the modern sea level (0–5000 BP) and at a lower sea level (in the postglacial time) [12]. If the penetration of icebergs with keels of 40–70 m or more into the waters of the Pukhuchan depression at the current sea level is indeed hindered, then at a depth of more than 70 m here (sectors 7 and 9), there are only relict gouges that formed at a sea level below the modern, more than 60 m. The high maximum gouge depth (up to 9.4 m) is an unexpected result. However, it is not always easy to judge the origin of a negative landform only by the part that falls within a narrow survey band, and, as already mentioned, they can have a mixed genesis. With rare exceptions, almost all gouges are single; scour combs are extremely rare. This indicates the predominance of single-keeled icebergs in the region. The results indicate a high activity of ice-gouging processes in the southwestern Kara Sea after the end of

the Late Pleistocene glaciation; however, the topography-forming role of modern icebergs remains to be assessed.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their gratitude to the administration and participants of cruise 52 of the R/V *Akademik Nikolaj Strakhov* for the opportunity to conduct research.

FUNDING

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 21-77-20038, GIN RAS, <https://rscf.ru/project/21-77-20038/>).

ETHICS APPROVAL AND CONSENT TO PARTICIPATE

This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

CONFLICT OF INTEREST

The authors of this work declare that they have no conflicts of interest.

REFERENCES

1. V. Yu. Biryukov and V. A. Sovershaev, "Geomorphology of the Kara Sea floor," in *Dynamics of the Arctic Coasts of Russia*, Ed. by V. I. Solomatina (Mos. Gos. Univ., Moscow, 1998), pp. 102–115 [in Russian].
2. O. V. Kokin, N. V. Kopa-Ovdienco, and A. S. Tsvetinskii, "Microrelief of the bottom of Baydaratskaya Bay and its dynamics," *Vesti Gazovoi Nauki*, No. 3 (14), 92–96 (2013).
3. S. V. Maznev, O. V. Kokin, A. V. Baranskaya, and S. A. Ogorodov, "Changes in the conditions of ice gouging in the seas of the Russian Arctic due to climate warming," in *Collection of Materials Presented at the All-Russian Conference with International Participation. XXIX Coastal Conference: Field and Theoretical Studies—into the Practice of Coastal Management* (2022), pp. 136–138.
4. S. G. Mironyuk and A. A. Ivanova, "Micro- and mesorelief of the glacial shelf of the Western Arctic seas in the light of new data," *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period* (2018), No. 76, pp. 41–58.
5. S. A. Ogorodov, *The Role of Sea Ice in the Dynamics of Coastal Relief* (Izd. Mos. Univ., Moscow, 2011) [in Russian].
6. A. E. Rybalko, S. G. Mironyuk, A. G. Roslyakov, et al., "New signs of glaciation in the Kara Sea: megascale glacial linearity in the East Novaya Zemlya Trench," *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii*, No. 7, 175–181 (2020).
7. A. V. Baranskaya, N. S. Khan, F. A. Romanenko, et al., "A postglacial relative sea-level database for the Russian Arctic Coast," *Quat. Sci. Rev.* **199**, 188–205 (2018).

8. P. W. Barnes, D. M. Rearic, and E. Reimnitz, "Ice gouging characteristics and processes," in *The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments*, Ed. by P. W. Barnes, D. M. Schell, E. Reimnitz (Acad. Press, Orlando, FL, 1984), pp. 185–212
9. A. M. Irrgang, M. Bendixen, L. M. Farquharson, et al., "Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts," *Nat. Rev. Earth Environ.* **3**, 39–54 (2022).
10. O. Kokin, S. Maznev, V. Arkhipov, 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, 2023).
11. O. Kokin, I. Usyagina, N. Meshcheriakov, et al., "Pb-210 dating of ice scour in the Kara Sea," *J. Mar. Sci. Eng.* **11**, 1404 (2023).
12. S. V. Maznev, O. V. Kokin, V. V. Arkhipov, and A. V. Baranskaya, "Modern and relict evidence of iceberg scouring at the bottom of the Barents and Kara seas," *Oceanology* **63** (1), 84–94 (2023).
13. A. Y. Miroshnikov, E. E. Asadulin, V. B. Komarov, et al., "Relief of the Kara Sea bottom and sediment sorption properties as pollution accumulation factors," *Oceanology* **61** (5), 714–726 (2021).
14. A. Montelli, J. A. Dowdeswell, A. Pirogova, et al., "Deep and extensive meltwater system beneath the former Eurasian ice sheet in the Kara Sea," *Geology* **48** (2), 179–183 (2020).
15. S. L. Nikiforov, L. I. Lobkovskii, N. N. Dmitrevskii, et al., "Expected geological and geomorphological risks along the Northern Sea Route," *Dokl. Earth Sci.* **466** (1), 75–77 (2016).
16. S. L. Nikiforov, N. O. Sorokhtin, R. A. Ananiev, et al., "Research in Barents and Kara seas during cruise 52 of the R/V *Akademik Nikolaj Strakhov*," *Oceanology* **62** (3), 433–434 (2022).
17. S. Ogorodov, V. Arkhipov, O. Kokin, et al., "Ice Effect on coast and seabed in Baydaratskaya Bay, Kara Sea," *Geography, Environment, Sustainability* **6** (3), 32–50 (2013).
18. S. A. Ogorodov, V. V. Arkhipov, A. V. Baranskaya, O. V. Kokin, and A. O. Romanov, "The influence of climate change on the intensity of ice gouging of the bottom by hummocky formations," *Dokl. Earth Sci.* **478** (2), 228–231 (2018).
19. L. Polyak, S. L. Forman, F. A. Herlihy, et al., "Late Weichselian deglacial history of the Svyataya (Saint) Anna Trough, northern Kara Sea, Arctic Russia," *Mar. Geol.* **143**, 169–188 (1997).
20. NASA. GISS Surface Temperature Analysis. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/index_v4.html.

Publisher's Note. Pleiades Publishing remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.