

УДК 550.8.052

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-2-125-133

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЮЖНОМ СКЛОНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-КАРСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ ПО МАТЕРИАЛАМ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕДИЦИЙ TTR-21 И TTR-23

Анастасия Константиновна Симонова<sup>1</sup>✉, Анастасия Сергеевна Пирогова<sup>2</sup>, Григорий Георгиевич Ахманов<sup>3</sup>, Михаил Юрьевич Токарев<sup>4</sup>, Александр Евменьевич Рыбалко<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; a\_simonova01@mail.ru ✉

<sup>2</sup> ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия; anastasya.pir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3619-7656>

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; akhmanov@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8884-2629>

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mjtokarev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8630-6083>

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; alek-rybalko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2871-5177>

**Аннотация.** В ходе двух экспедиций международной научно-образовательной программы «Обучение через исследования» (Training-through-Research) TTR-21 и TTR-23, проведенных на научно-исследовательском судне «Академик Борис Петров» в 2022 и 2024 гг. при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, были получены новые данные о строении четвертичных отложений в северной части Карского моря, зафиксированы признаки распространения ледникового покрова поздневалдайского (сартанского) времени. С использованием данных комплекса геофизических методов, включавшего акустическое профилирование и сейсморазведку сверхвысокого и высокого разрешения по методике общей глубинной точки, выполнен сейсмостратиграфический анализ разрезов, полученных на полигоне детальных исследований «Kasania». Выявлено распространение и проанализирована морфология вытянутых моренных гряд отступления ледника в Центрально-Карском желобе и на примыкающем к нему южном склоне Центрально-Карской возвышенности. Сделан вывод о существовании ледникового центра (купола) на Центрально-Карской возвышенности в поздневалдайское (сартанское) время в виде изолированного ледника или части крупного Евразийского покровного ледникового щита.

**Ключевые слова:** Карское море, сартанское оледенение, акустическое профилирование, сейсморазведка сверхвысокого разрешения, сейсмическая интерпретация, морены де Гира

**Для цитирования:** Симонова А.К., Пирогова А.С., Ахманов Г.Г., Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е. Особенности распространения ледниковых отложений на южном склоне Центрально-Карской возвышенности по материалам высокоразрешающего сейсмического профилирования: результаты экспедиций TTR-21 и TTR-23 // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 2. С. 125–134.

## DISTRIBUTION PATTERNS OF GLACIAL DEPOSITS ON THE SOUTHERN SLOPE OF THE CENTRAL KARA UPLIFT BASED ON HIGH-RESOLUTION SEISMIC PROFILING: RESULTS OF THE TTR-21 AND TTR-23 EXPEDITIONS

Anastasiya K. Simonova<sup>1</sup>✉, Anastasiya S. Pirogova<sup>2</sup>, Grigoriy G. Akhmanov<sup>3</sup>, Mikhail Yu. Tokarev<sup>4</sup>, Aleksander E. Rybalko<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; a\_simonova01@mail.ru ✉

<sup>2</sup> LLC “Center for Seismic Data Analysis, Lomonosov Moscow State University”, Moscow, Russia; anastasya.pir@gmail.com

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; akhmanov@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8884-2629>

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mjtokarev@gmail.com

<sup>5</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia; alek-rybalko@yandex.ru

**Abstract.** During two expeditions of the international scientific and educational program “Training-through-Research,” TTR-21 and TTR-23, conducted on the research vessel “Akademik Boris Petrov” in 2022 and 2024 with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, new data were obtained on Quaternary section in the northern Kara Sea. Evident ice marginal landforms of Late Weichselian (Sartanian) ice-sheet were recorded. Using data from a combination of geophysical methods, including acoustic profiling and ultra-high-resolution and high-resolution seismic survey with the common depth point technique, as well as multibeam echo sounding data, a seismic stratigraphic analysis was carried out for sections obtained on the “Kasania” area. The distribution and morphology of elongated moraine ridges of glacier retreat in the Central Kara Trough and on the adjacent southern

slope of the Central Kara Rise were identified and analyzed. It is concluded that a ice dome existed on the Central Kara Rise during the Late Weichselian (Sartanian) time, either as an isolated glacier or part of a larger Eurasian ice sheet.

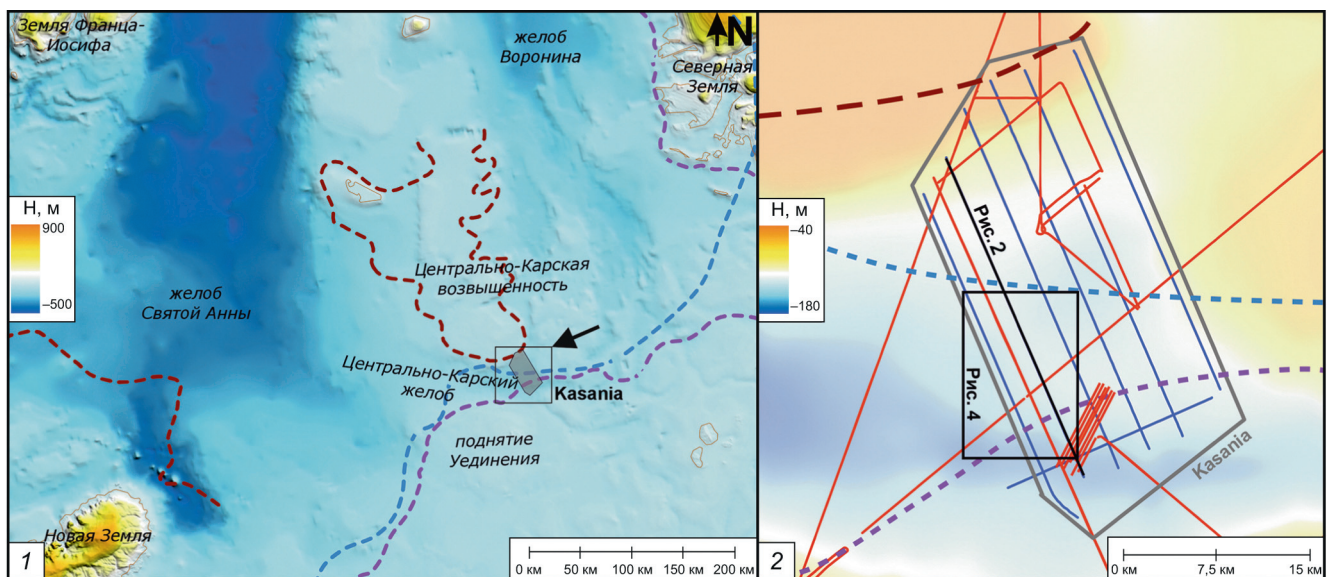
**Keywords:** Kara Sea, Late Weichselian glaciation, acoustic profiling, ultra-high-resolution seismic reflection, seismic interpretation, de Geer moraines

**For citation:** Simonova A.K., Pirogova A.S., Akhmanov G.G., Tokarev M.Yu., Rybalko A.E. Distribution patterns of glacial deposits on the southern slope of the Central Kara Uplift based on high-resolution seismic profiling: results of the TTR-21 and TTR-23 expeditions. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 2: 125–134. (In Russ.).

**Введение.** Масштабу и истории неоплейстоценовых оледенений в северной части Карского шельфа посвящен ряд исследований [Гайнанов и др., 2005; Polyak et al., 2008; Dittmers et al., 2008; Гусев и др., 2012с; Рыбалко и др., 2022; Аксенов и др., 2023]. Тем не менее, многие вопросы остаются пока нерешенными, главным образом, из-за ограниченного объема геологических и геофизических данных. Сторонники развития обширного покровного позднечетвертичного (сартанского) оледенения [Svendsen et al., 2004; Patton et al., 2015; Hughes et al., 2016] предлагают различные варианты реконструкций северо-восточной границы Евразийского ледникового щита, исходя из имеющегося у них материала и подходов к его интерпретации (рис. 1). В этих работах, опирающихся на анализ геологических, геоморфологических и геофизических данных, изучение кернов, датирование отложений и численное моделирование, контуры последнего оледенения существенно разнятся, иногда на десятки километров. Составители комплекта карт листа Т-41-44 Гостгеолкарты-1000 [Костин, 2006] совсем не предполагают развития покровного оледенения на севере Карского шельфа в позднем валдае, указывая на возможное

существование лишь изолированных ледниковых массивов на отдельных крупных возвышенностях, включая Центрально-Карское поднятие [Васильев и др., 2013].

В ходе экспедиции ТТР-21 (2022) научно-образовательной программы «Обучение через исследование (Training-through-Research)» на севере Карского шельфа были выполнены комплексные геолого-геофизические работы по картированию рельефа дна и изучению четвертичных отложений в пределах нескольких полигонов детальных исследований [Токарев и др., 2022]. Были обнаружены и описаны многочисленные формы ледниковой и флювиогляциальной природы, соотносимые с позднечетвертичным оледенением (морская изотопная стадия 2, МИС-2) [Аксенов и др., 2023; Рыбалко и др., 2022], выявлены следы палео-ледниковых потоков, двигавшихся с Центрально-Карской возвышенности к ее южному склону. В экспедиции ТТР-23, проходившей с 7 августа по 15 сентября 2024 г., детальные исследования верхнеплейстоценовых отложений с целью более точного определения границ оледенения были продолжены с применением комплекса геолого-геофизических дистанционных и прямых



Граница максимума последнего оледенения по:

- [Hughes et al, 2016]
- [Patton et al, 2015]
- [Васильев и др., 2013]

Профили сейсмоакустической съемки:

- Экспедиции ТТР-21 (2022 г.)
- Экспедиции ТТР-23 (2024 г.)

Рис. 1. Расположение полигона детальных исследований «Kasania» в северной части Карского шельфа (1). Батиметрическая основа — цифровая батиметрическая модель ИВСаО (International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean [Jakobsson et al., 2012]) с разрешением 500 м. Полигон детальных исследований «Kasania» с нанесенными линиями сейсмоакустической съемки (2)

методов. Полученные материалы выявили сложное строение верхней части осадочного разреза Северо-Карского шельфа, широкую литологическую и генетическую неоднородность слагающих его отложений.

В статье описываются сейсмокомплексы, выделенные на основе полученных в экспедициях TTR-21 и TTR-23 сейсмоакустических данных, которые отражают смену обстановок осадконакопления в регионе в течение завершающего этапа последнего оледенения и последующего перехода к морской седиментации. Также, новый материал позволил более уверенно утверждать распространение моренных отложений в изучаемой части южного склона Центрально-Карского поднятия и предположить их поздневалдайский возраст.

**Район исследования.** Одним из участков детальных исследований, выполненных в экспедициях TTR-21 и TTR-23 с целью изучения позднечетвертичной истории региона, стал полигон, получивший название «Kasania». Он расположен на южном склоне Центрально-Карской возвышенности и включает в себя участок Центрально-Карского желоба (рис. 1). Глубины воды изменяются от 42 м на севере до 198 м на юге полигона.

Общее, но самое систематизированное, представление о строении четвертичного разреза рассматриваемого участка Северо-Карского шельфа можно получить из комплекта карт листа Т-41-44 Гостеолкарты-1000 [Васильев и др., 2013]. Самыми древними отложениями четвертичной системы, согласно карте четвертичных образований, выступают морские и ледниково-морские нижне-среднеплейстоценовые образования ( $m_{gmI-II}$ ), ограниченно распространенные на локальных участках в границах Центрально-Карской возвышенности. Они перекрываются верхнеплейстоценовым комплексом, представленным практически сплошным покровом в пределах изучаемого района. Как упоминалось выше, авторы Гостеолкарты-1000 [Васильев и др., 2013] считают, что в границах Центрально-Карской возвышенности валдайский ледник был автономным, маломощным, вероятнее всего, неподвижным или малоподвижным, и им не могли быть сформированы моренные отложения значительной толщины. Поэтому в составе верхнеплейстоценового комплекса Васильев с соавторами [2013] выделяют только морские нефелоидные отложения с участием ледовой транспортировки ( $m_{gIII}$ ), образующие покровно-облекающие и плащеобразные формы. Выше залегают нерасчлененные верхнеплейстоценовые — современные отложения разного генезиса — ледниково-морские ( $gm_{III_4-N}$ ), гляциогенные-морские ( $G, m_{III_4-N}$ ) и ледниково-морские и морские ( $gm, m_{III_4-N}$ ). В составе голоценового комплекса выделяют также морские флювиальные-декливиальные отложения ( $mf, mdH$ ), широко распространенные на склонах Центрально-Карской возвышенности [Васильев и др., 2013].

По ранее опубликованным данным экспедиции TTR-21 южнее полигона «Kasania» отмечаются характерные гляциальные формы современного рельефа и широкое развитие ледниково-морских образований [Аксенов и др., 2023]. Мы предполагаем значительное и даже определяющее влияние поздневалдайского оледенения на формирование верхнеплейстоценовых отложений района южного подножья Центрально-Карского поднятия и Центрально-Карского желоба. Мощность голоценовых морских отложений увеличивается с глубиной моря.

**Методы.** В пределах полигона «Kasania» был выполнен комплекс геофизических исследований, включавший работы на профилях и полигонах. Проведена сейсморазведка сверхвысокого разрешения по методу общей глубинной точки (ССВР МОГТ) общим объемом 595 погонных км, при выполнении которой совместно осуществлялось акустическое профилирование (АПР) общей протяженностью 762 погонных км.

Акустическое профилирование производилось с применением параметрического профилографа Parasound P70 производства компании Teledyne RESON Inc. (США), встроенного в блистер НИС «Академик Борис Петров». Параметрические частоты, выбранные для работы профилографа, составляли 4 кГц (низкая вспомогательная частота), 22 кГц (основная высокая частота) и 44 кГц (высокая вспомогательная частота). Глубинность акустического профилирования составляла 5–30 м от поверхности дна при вертикальной разрешающей способности 0,1–1 м на нижней рабочей частоте.

В работе использовались материалы сейсморазведки, полученные в различных рейсах, при этом в рейсе TTR-21 исследования проводились с использованием источника с центральной частотой около 220 Гц, соответствующей сейсморазведке вы-

Таблица 1

**Сводная таблица характеристик аппаратуры для проведения сейсморазведки высокого и сверхвысокого разрешения**

Параметры методики / экспедиция	TTR-21	TTR-23
Накопитель энергии	MultiJack-5000HP6.0	SPES-1000
Сеймостанция	Spectra-Geo 24-разрядная	SplitMultiSeis Station 24-разрядная
Пьезокося, кол-во-каналов (одиночных гидрофонов)	16	16
Шаг между каналами, м	2	2
Спаркер, кол-во электродов	58	58
Энергия, кДж	3,5–4	0,66
Центральная частота, Гц	220	500
Заглубление источника, м	1,6	0,75
Длина записи, мс	450, 700, 950	750
Шаг дискретизации, мс	0,0625–0,125	0,064

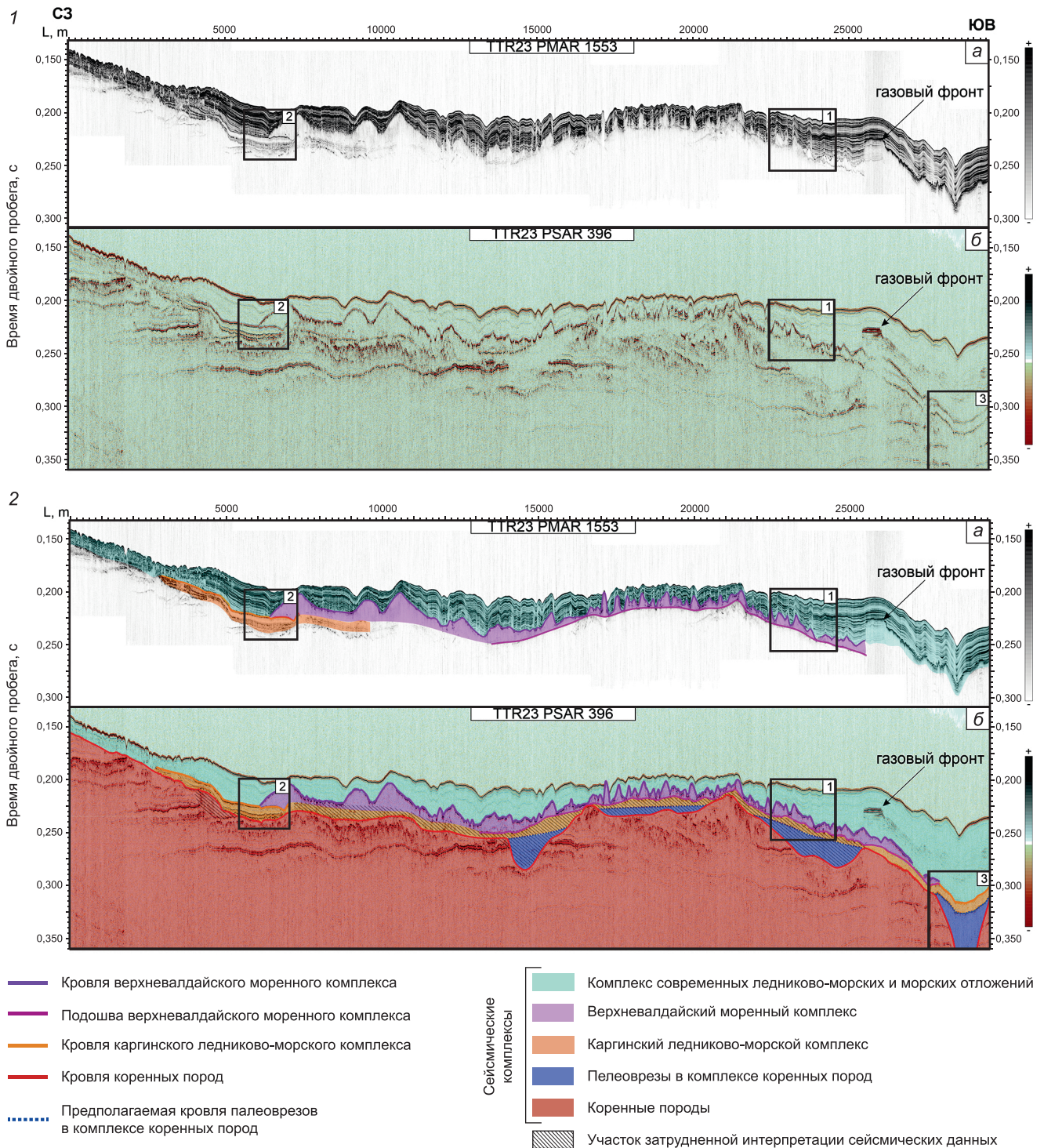


Рис. 2. Профили акустического профилирования (а) и сейсморазведки сверхвысокого разрешения (б): 1 — исходные записи без интерпретации; 2 — соответствующие профили с элементами интерпретации. Выделенные фрагменты профилей 1, 2 и 3 приведены на рис. 3

сокого разрешения (СВР), тогда как в рейсе ТТR-23 применялась более высокая центральная частота порядка 500 Гц, характерная для сейсморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР). Характеристики специализированного оборудования приведены в табл. 1. Система наблюдений основывалась на классической схеме МОГТ и включала одну пьезокосу и один источник. Шаг между приемниками 2 м, длина пьезокосы — 30 м.

Интерпретация обработанных материалов сейсморазведки и акустического профилирования осуществлялась в рамках сейсмостратиграфического анализа. Сейсмические комплексы выделялись по совокупности отражающих горизонтов, объединенных по сходству морфологии и характера залегания отражающих поверхностей и ограниченных выраженными несогласиями. Стратиграфическая привязка выделенных комплексов выполнялась

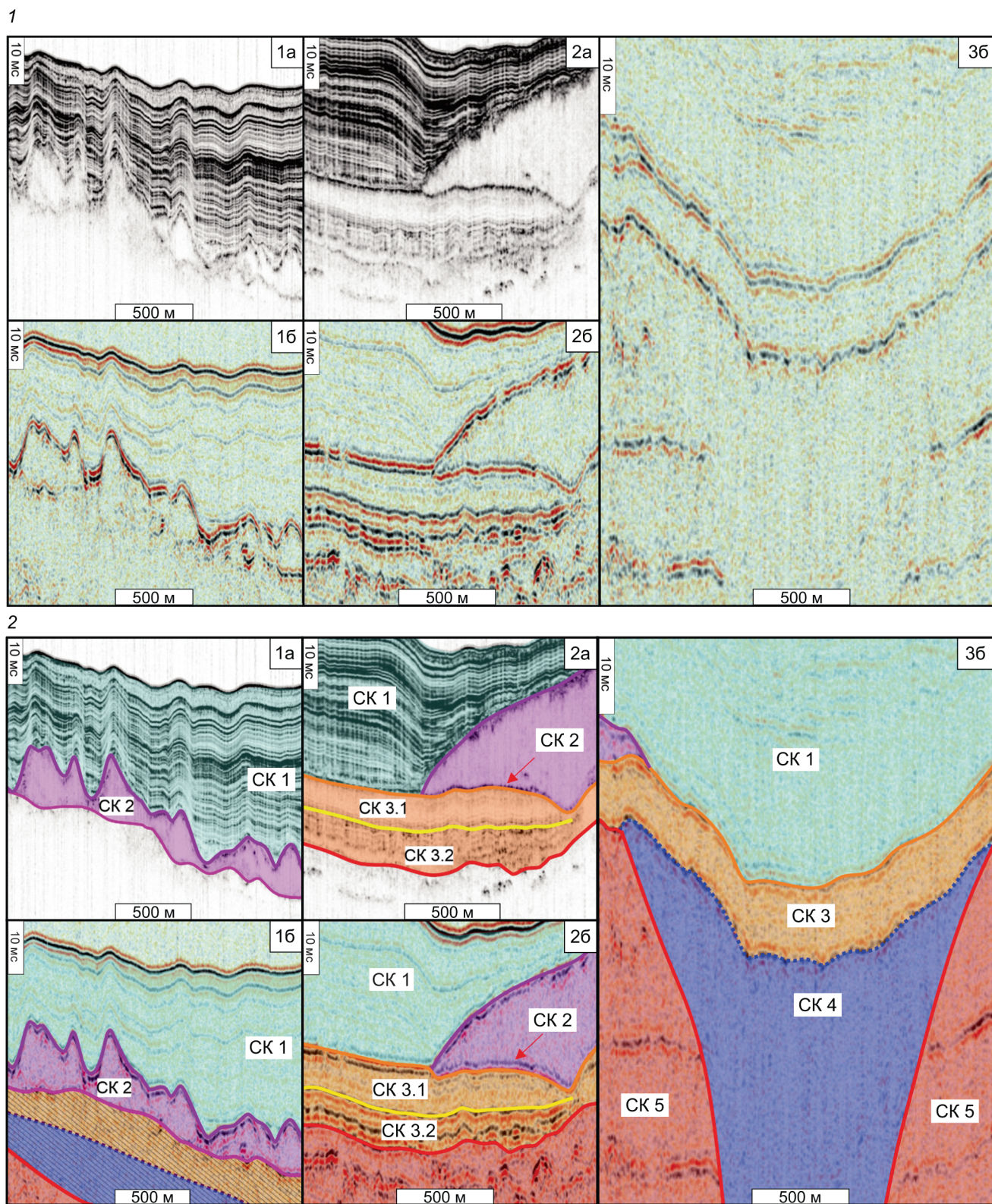


Рис. 3. Фрагменты профиля акустического профилирования (1а, 2а) и сейморазведки сверхвысокого разрешения (16, 26, 36) сейсмических комплексов СК 1–СК 3: 1 — исходные без интерпретации; 2 — соответствующие фрагменты с элементами интерпретации. Красными стрелками показано налегание моренного комплекса (СК 2) на каргинский ледниково-морской (СК 3). Положение фрагментов показано на рис. 2

с опорой на опубликованные сейсмостратиграфические схемы и геолого-геофизические данные, положенные в основу Государственной геологической карты масштаба 1 : 1 000 000 [Васильев и др., 2013].

**Результаты и обсуждение.** В пределах полигона «Kasania» на данных сейморазведки сверхвысокого разрешения и акустического профилирования было выделено пять сейсмических комплексов (СК 1 —

Таблица 2

## Характеристика сейсмических комплексов на полигоне "Kasania"

СК	Характер кровли	Характер подошвы	Волновая картина	Амплитуды отражений	Генезис	Предположительный возраст
СК 1	Морское дно, неровная	Сильно неровная	Пологоволнистая (АПр), прозрачная, местами слоистая (ССВР), слоистая (СВР)	Высокие (АПр и СВР), Низкие (ССВР)	Нерасчлененные ледниково-морские и морские отложения	терминальный поздний неоплейстоцен, четвертая ступень — голоцен (Ш <sub>4</sub> — Н)
СК 2	Сильно неровная	Гладкая (?)	Акустически прозрачная (АПр), хаотическая/ акустически прозрачная (ССВР, СВР)	Низкие (ССВР, СВР, АПр)	Ледниковые отложения	поздний неоплейстоцен, четвертая ступень (Ш <sub>4</sub> )
СК 3.1, 3.2	Гладкая	Гладкая	Субгоризонтальные оси синфазности	Высокие для СК 3.2, низкие для 3.1	Ледниково-морские отложения	поздний неоплейстоцен, третья ступень (Ш <sub>3</sub> )
СК 4	Гладкая	Сильно неровная	Акустически прозрачная	Низкие (ССВР, СВР)	Выполнение палеоврезов	не моложе позднего неоплейстоцена, третьей ступени (?)
СК 5	Сильно неровная		Субгоризонтальные и наклонные оси синфазности. Участками — зоны потери корреляции	Высокие (ССВР, СВР)	Лагунные и озерно-аллювиальные отложения прибрежно-континентальной равнины [Васильев и др., 2013]	сеноман и древнее [Васильев и др., 2013]

СК 5), иллюстрирующих основные этапы развития региона (рис. 2; 3). Основные характеристики выделенных сейсмических комплексов детально представлены ниже, а кратко — в табл. 2.

**СК 1 — Современные ледниково-морские и морские отложения.** Верхним сейсмическим комплексом является СК 1, характеризующийся на записях акустического профилирования пологоволнистой слоистостью с хорошо выраженными амплитудами отражений. Характерной особенностью комплекса является конформность амплитуд изгибов осей синфазности подошве комплекса на разрезах профилографа при их слабом затухании вверх по разрезу, что, по-видимому, указывает на отсутствие слоистости облекания. Следует обратить внимание на то, что на разрезах сейсморазведки сверхвысокого разрешения, полученных в ТТР-21 с использованием более низкой центральной частоты (220 Гц), акустическая структура СК 1 характеризуется выраженной слоистостью (рис. 4, 2). В то же время на разрезах, полученных в рейсе ТТР-23, с центральной частотой 500 Гц акустическая картина комплекса преимущественно прозрачная, местами слабо волнистая, что отличается от более четко выраженной слоистости, наблюдаемой на данных акустического профилографа. Данные различия обусловлены различиями в частотных диапазонах и вертикальной разрешающей способности используемых методов. Отсутствие выраженной слоистости на более высокочастотной ССВР отражает частотно-зависимый характер взаимодействия сейсмического сигнала со средой.

Комплекс повсеместно распространен в пределах полигона исследований, его общая мощность закономерно увеличивается в понижениях рельефа, что свидетельствует о постледниковом

осадконакоплении в условиях преимущественно гидродинамически спокойного бассейна. Комплекс сложен нерасчлененной песчано-алевро-пелитовой толщей ледниково-морских (в основании комплекса) и морских отложений и охватывает временной интервал с самого конца позднего неоплейстоцена по настоящее время. Слоистый облик толщи, вероятно, отражает вариации в объемах поступления терригенного материала в бассейн седиментации в течение голоцена.

**СК 2 — Верхневалдайский (сартанский) моренный комплекс.** По акустически прозрачной волновой картине и высокоамплитудной отражающей кровле выделяется СК 2. Характеристики комплекса на сейсмических разрезах позволяют считать, что комплекс представлен ледниковым тиллом (моренной). В нижней части комплекса на отдельных разрезах прослеживается протяженная ось синфазности, которая, вероятно, соответствует подошве СК 2 и на рисунках выделена розовой границей. Кроме того, внутри комплекса отмечаются локальные высокоамплитудные обрывки осей синфазности, что может указывать на присутствие включений грубообломочного (валунного) материала, размеры которого соизмеримы с длиной волны и приводят к формированию дифрагированных волн. Положение этого комплекса в разрезе указывает на поздневалдайский (сартанский) возраст. Для моренных отложений СК 2 характерны резкие вариации мощности в пределах исследуемого района. Кровля комплекса нерегулярно и амплитудно ундулирует. У подножья Центрально-Карской возвышенности наблюдаются крупные моренные тела, сменяющиеся на профиле по направлению к Центрально-Карскому желобу многочисленными мелкими формами с более крутыми склонами (рис. 2). Вероятно, такой холмистый

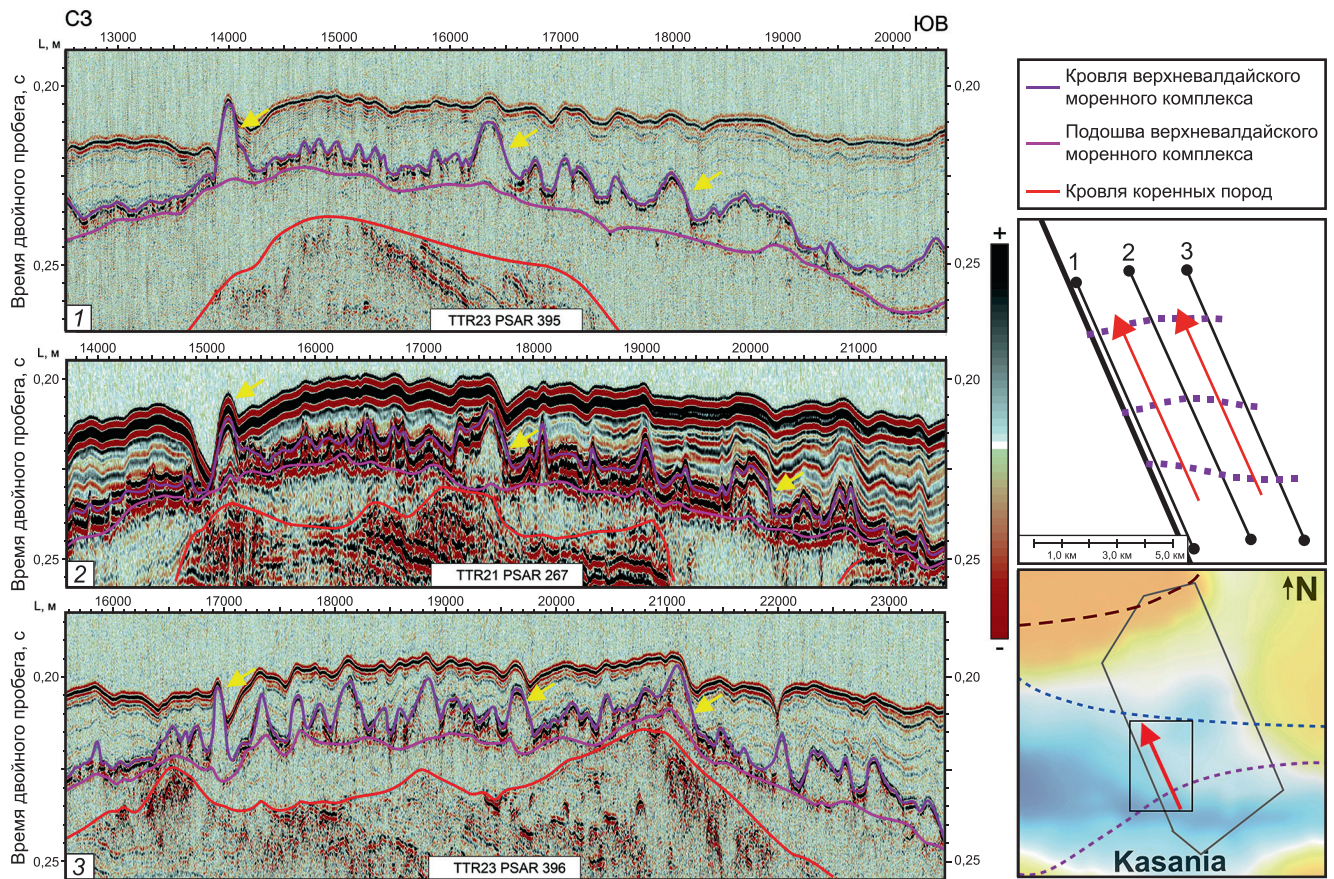


Рис. 4. Серия сейсмоакустических разрезов с выделенными моренными телами (показаны желтыми стрелками), предположительно являющимися протяженными параллельными грядами (пунктирная фиолетовая линия указывает на их вероятное простирание). Красными стрелками на врезках показано вероятное отступление фронта ледникового щита

палео-рельеф возник в результате неравномерного накопления моренного материала и ледниковой экзарации при надвигании льдов на ледниковые отложения. Высота холмов, отмечаемых на разрезах — до 25 м (рис. 4). Отдельные холмы хорошо прослеживаются на параллельных разрезах, сохраняя, в целом, свою морфологию и размеры (рис. 4). Это дает основание утверждать, что рассматриваемые сейсмические профили пересекают систему параллельных палео-гряд, которые, по всей видимости, являются моренными грядами. Мелкие холмы могут быть интерпретированы, как морены де Гира, формировавшиеся в период общего отступления ледника и фиксирующие временные остановки или даже небольшие сезонные продвижения ледникового края. Более крупные тела, вероятно, представляют собой т.н. призмы отлегания (grounding-zone wedge), формирующиеся субаквально при всплывании края ледника в морских условиях [Batchelor, Dowdeswell, 2015]. Подобные ледниковые формы характерны для ближайшего баренцевоморского шельфа [Dowdeswell et al., 2016]. Точное определение генезиса крупных форм требует более детальных исследований, но в любом случае такие формы маркируют периоды относительно длительного стационарного положения края ледника.

**СК 3 — Каргинский ледниково-морской комплекс.** С несогласием залегая на СК 5 и СК 4, на

части площади выделяется комплекс СК 3, волновая картина которого представлена субгоризонтальными отражениями. Налегание моренного комплекса СК 2 на отложения СК 3 четко прослеживается на отдельных участках профилей (рис. 2; 3), где данная граница показана красной стрелкой, что, наряду с характером волновой записи, свидетельствует о более древнем возрасте СК 3 и его формировании в морских условиях до наступления верхневалдайского (сарганского) оледенения.

На части площади можно разделить СК 3 на два подкомплекса (СК 3.1 и СК 3.2). Для СК 3.2 характерны высокоамплитудные отражения, четко прослеживающиеся как на данных АПр, так и на ССВР. Вверх по разрезу волновая картина становится слабоамплитудной и выделяется в СК 3.1. Такая волновая картина может определяться наличием в подошве комплекса плохосортированных и относительно грубозернистых накоплений с большим количеством гравийно-галечного материала, сменяемых вверх по разрезу более тонкими, преимущественно алевро-пелитовыми отложениями с заметно меньшим количеством грубообломочной примеси.

Разрез отражает эволюцию осадконакопления в трансгрессию межледниковья и позволяет предполагать либо смену условий с континентальных на морские, либо уменьшение поступления грубозернистого материала в бассейн седиментации

в морских условиях, например, за счет сокращения количества айсбергов. Фрагментарное проявление СК 3 на сейсмоакустических профилях, вероятно, связано как с частичной эрозией отложений в ходе последующего валдайского оледенения, так и с их слабоконтрастными акустическими свойствами, затрудняющими уверенное прослеживание комплекса на всей площади исследований. Учитывая также стратиграфическую позицию комплекса СК 3 непосредственно под верхневалдайскими (сартанскими) ледниковыми отложениями, можно предположить его ледниково-морской генезис и отнести к каргинскому интерстадиалу.

**СК 4 — Комплекс заполнения палеоврезов.** Сейсмокомплекс 4 (СК 4) отвечает комплексу заполнения палео-врезов, в разной степени выраженных на профилях. Его подошва — это поверхность эрозии коренных пород в комплексе СК 5. Границы врезов четко отмечаются по резким обрывам осей синфазности отражающих горизонтов в СК 5. Волновая картина СК 4 характеризуется акустической прозрачностью и отсутствием выраженных отражений. Состав отложений, слагающих комплекс, по имеющимся данным неопределим. Можно предположить, как существенно тонкозернистое морское выполнение врезов, так и выполнение более грубообломочным и плохосортированным материалом ледниковой природы. В обоих случаях на сейсмических разрезах ожидается отсутствие отражений из-за отсутствия акустически контрастных и протяженных границ. Стратиграфическая позиция позволяет предполагать, что формирование врезов и их выполнение отложениями комплекса СК 4 происходило не позднее ранне-каргинского времени (поздний неоплейстоцен, третья ступень), что сопоставимо с этапом формирования палеодолин и палеодепрессий, установленных в юго-западной части Карского моря [Замотина, 2024].

**СК 5 — Коренные породы мелового возраста.** В нижней части изученного разреза практически повсеместно отмечается угловое несогласие, интерпретируемое как кровля комплекса коренных пород, подстилающего пачки четвертичных отложений. По поверхности несогласия проводится кровля сейсмо-стратиграфического комплекса СК 5, представленного на сейсмических разрезах преимущественно субгоризонтальными и высокоамплитудными отражениями. Конфигурация отражений внутри СК 5 соответствует конформному залеганию пластов на большей части изучаемой площади. Однако, на некоторых участках профилей внутри СК 5 фиксируются зоны потери корреляции отражений с характерной хаотической волновой картиной. По всей видимости, это связано с повышенным газонасыщением пород в пределах описанных участков. Верхняя часть комплекса СК 5 очевидно эродирована. Сопоставляя выделенный комплекс с региональными сеймо-стратиграфическими схемами, отложения определены как песчано-алеврито-глинистые, вероятно, слабо-

консолидированные, ранне-сеноманского и более древнего возраста [Васильев и др., 2013].

Полученные геолого-геофизические данные позволяют заключить, что полигон «Kasania» расположен в зоне, которая в позднем неоплейстоцене подвергалась воздействию оледенения, а затем прошла стадии дегляциации. Строение разреза, морфология сейсмокомплексов и особенности волновой картины отражают историю осадконакопления, связанную со сменой ледниковых, ледниково-морских и морских обстановок.

Анализ пространственного распределения моренных форм и морфологии отражающих горизонтов свидетельствует о том, что фронт ледника при таянии смещался в северном направлении на Центрально-Карскую возвышенность. Это направление движения, ориентированное перпендикулярно системе выявленных моренных гряд, указывает на существование в поздневалдайское время на Центрально-Карской возвышенности ледникового купола. Такой купол мог развиваться изолированно и самостоятельно или быть периферийной частью крупного Евразийского ледникового щита.

**Заключение.** В ходе экспедиций TTR-21 и TTR-23 были получены новые данные, позволившие уточнить строение верхней части четвертичного разреза, выявить типичные ледниковые образования и пространственные особенности их распространения у подножья южного склона Центрально-Карской возвышенности и в Центрально-Карском желобе.

Выполнен комплексный анализ сейсмоакустических материалов по полигону детальных исследований «Kasania», выделены пять сейсмических комплексов, отражающих смену условий осадконакопления с переходом в позднем неоплейстоцене — голоцене от ледниковых и ледниково-морских условий к современным морским.

Впервые закартирован фрагмент системы моренных гряд (конечные морены и морены де Гира), сформированных в условиях деградации ледникового щита, реконструировано направление отступления его фронта в ходе дегляциации; установлено, что край ледника отступал на север, освобождая сначала Центрально-Карский желоб, а потом южное подножье Центрально-Карской возвышенности.

Подтверждена гипотеза о существовании ледникового центра (купола) на Центрально-Карской возвышенности в поздневалдайское (сартанское) время; такой купол мог быть изолированным ледником или являться частью крупного Евразийского покровного ледникового щита.

Полученные результаты значительно дополняют существовавшие ранее представления о позднечетвертичной геологической эволюции района.

**Благодарности.** Авторы признательны экипажу и членам научного состава за совместную плодотворную работу на борту научно-исследовательского судна «Академик Борис Петров» в ходе экспедиций TTR-21 и TTR-23.

**Финансирование.** Анализ полученного в экспедициях материала и подготовка рукописи осуществлены в рамках Государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова № АААА-А16-116033010107-1 и по

теме работ Учебно-научного Центра ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксенов А.О., Пирогова А.С., Рыбалко А.Е. Признаки сарганского оледенения южной части Северо-Карского шельфа по данным геофизических исследований в рейсе ТТР-21 // Геофизика. 2023. № 2. С. 21–28.

Васильев В.В., Вискунова К.Г., Кийко О.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист Т-41–44 — мыс Желания. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 200 с.

Гайнанов В.Г., Поляк Л.В., Гатауллин В.Н., Зверев А.С. Сейсмоакустические исследования следов покровных оледенений в Карском море // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2005. № 1. С. 38–44.

Гусев Е.А., Шарин В.В., Дымов В.А. и др. Новые данные о строении верхних горизонтов осадочного чехла северной части Карского шельфа // Разведка и охрана недр. 2012с. № 8. С. 87–90.

Замотина З.С. Особенности строения и происхождения палеодолин и палеодепрессий юго-западной части Карского моря по сейсмическим данным и данным многолучевого эхолотирования: Автореф. канд. дисс. М., 2024.

Качурина Н.В., Макарьев А.А., Макарьева Е.М. и др. Гос. геол. карта РФ. Масштаб 1:1 000 000. Серии Северо-Карско-Баренцевоморская и Таймырско-Североземельская. Лист Т-45–48 — м. Челюскин. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. С. 568.

Костин Д.А., Орго В.В. Карта четвертичных образований. // Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист Т-41–44 — мыс Желания. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006.

Рыбалко А. Е., Токарев М. Ю., Полудеткина Е. Н. и др. Первые результаты научно-экспедиционных работ в северной части Карского моря по программе Плавучего университета «Обучение через исследование» (ТТР-21) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. № 9. С. 233–240.

Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е., Полудеткина Е.Н. и др. Итоги экспедиции ТТР-21: новые данные о четвертичном седиментогенезе, рельефообразовании и флюидоразгрузке в северо-восточной части Карского шельфа // Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022. Труды XI Международной научно-практической конференции, Москва, 24–28 октября 2022 г. Т. IV (IV). Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. С. 254–258.

Batchelor C.L., Dowdeswell J.A. Ice-sheet grounding-zone wedges (GZWs) on high-latitude continental margins // Marine Geology. 2015. Vol. 363. P. 65–92.

Dittmers K., Niessen F., Stein R. Acoustic facies on the inner Kara Sea shelf: Implications for Late Weichselian to Holocene sediment dynamics // Marine Geology. 2008. Vol. 254(3–4). P. 197–215.

Dowdeswell J. A., Canals M., Jakobsson M., et al. Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient // Geological Society. Vol. 46. London: Memoirs, 2016. P. 333–336.

Jakobsson M., Mayer L., Coakley B., et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0: IBCAO VERSION 3.0 // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39 (12).

Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., et al. The last Eurasian ice sheets — a chronological database and time-slice reconstruction // DATED-1. Boreas. 2016. Vol. 45. P. 1–45.

Patton H.K., Andreassen L.R., Bjarnadóttir J.A., et al. Geophysical constraints on the dynamics and retreat of the Barents Sea ice sheet as a paleobenchmark for models of marine ice sheet deglaciation. // Rev. Geophys. 2015. Vol. 53. P. 1051–1098.

Polyak L., Niessen F., Gataullin V., Gainanov V. The eastern extent of the Barents–Kara ice sheet during the Last Glacial Maximum based on seismic-reflection data from the eastern Kara Sea // Polar Research. 2008. Vol. 27 (2). P. 162–172.

Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V., et al. Late quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. No. 11–13. P. 1229–1271.

Статья поступила в редакцию 25.10.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 24.04.2026