

## НОВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ВАЛДАЙСКОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО ШЕЛЬФА (МАТЕРИАЛЫ TTR-19 И TTR-20)

<sup>1</sup>Соловьева М.А., <sup>1</sup>Ахманов Г.Г., <sup>2</sup>Монтелли А.И.

<sup>1</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия; marina-sol@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт полярных исследований имени Скотта, Кембридж, Великобритания; aim39@cam.ac.uk

Детальные геоморфологические исследования различными геофизическими методами, выполненные в рейсах TTR-19 и TTR-20 на акватории северо-восточной части Баренцева моря, позволили обнаружить и закартировать широкое разнообразие гляциальных форм рельефа. Их обнаружение является неопровержимым свидетельством развития покровного оледенения на данной территории. Анализ распространения и ориентации ледниковых форм рельефа позволил впервые для данного региона провести детальную реконструкцию направлений течений ледниковых потоков в поздне-Валдайское время, которая значительно уточнила существующие модели развития оледенения.

Ключевые слова: *Баренцево море, многолучевое эхолотирование, сейсмоакустическое профилирование, гляциальные формы рельефа, Валдайское оледенение*

**Введение.** Одним из остро дискуссионных вопросов арктических районов, в особенности, западно-арктических шельфов, является вопрос о существовании или отсутствии в четвертичное время ледниковых покровных оледенений. На данное время, одной из распространённых гипотез является представление о существовании мощного ледникового покрова, охватывавшего всю территорию Баренцевоморского шельфа, а также прилегающие участки суши [Svendsen et al., 2004; Hugles et al., 2016; и др.]. Основными свидетельствами существования ледника являются различные формы рельефа, которые сформировались при движении ледовых масс или талых вод.

Западный сектор Баренцева моря характеризуется хорошей геолого-геофизической изученностью, которая позволила сделать детальные реконструкции развития ледника в поздне-четвертичное время [e.g. Bjarnadóttir et al., 2014; Jakobsson et al., 2014; Patton et al., 2015]. В то же время, существующие модели оледенения для восточной (русской) части баренцевоморского шельфа носят гипотетический характер в связи с малым количеством данных. Наибольший интерес представляет северо-восточная часть Баренцева моря, которая является ключевой в вопросах реконструкции динамики оледенения [Dowdeswell et al., 2021]. Однако именно этот регион характеризуется наименьшей изученностью.

В связи с этим, летом 2020 года и осенью 2021 года были организованы международные мультидисциплинарные научные экспедиции Плавучего Университета ЮНЕСКО-МГУ по программе «Training-through-Research» (TTR-19 и TTR-20), одной из задач которых являлось исследование поверхности морского дна с целью реконструкции динамики развития ледникового покрова в северной части Баренцевоморского шельфа. Исследования проводились на обширном участке к югу от Земли Франца Иосифа (Рис. 1) на научно-исследовательском судне «Академик Николай Страхов».

**Данные и методы.** В ходе экспедиционных работ были проведены обширные геофизические, геологические, геохимические, гидрогеологические, инженерно-геологические и микробиологические исследования на площади около 200 000 км<sup>2</sup> (Рис. 1).

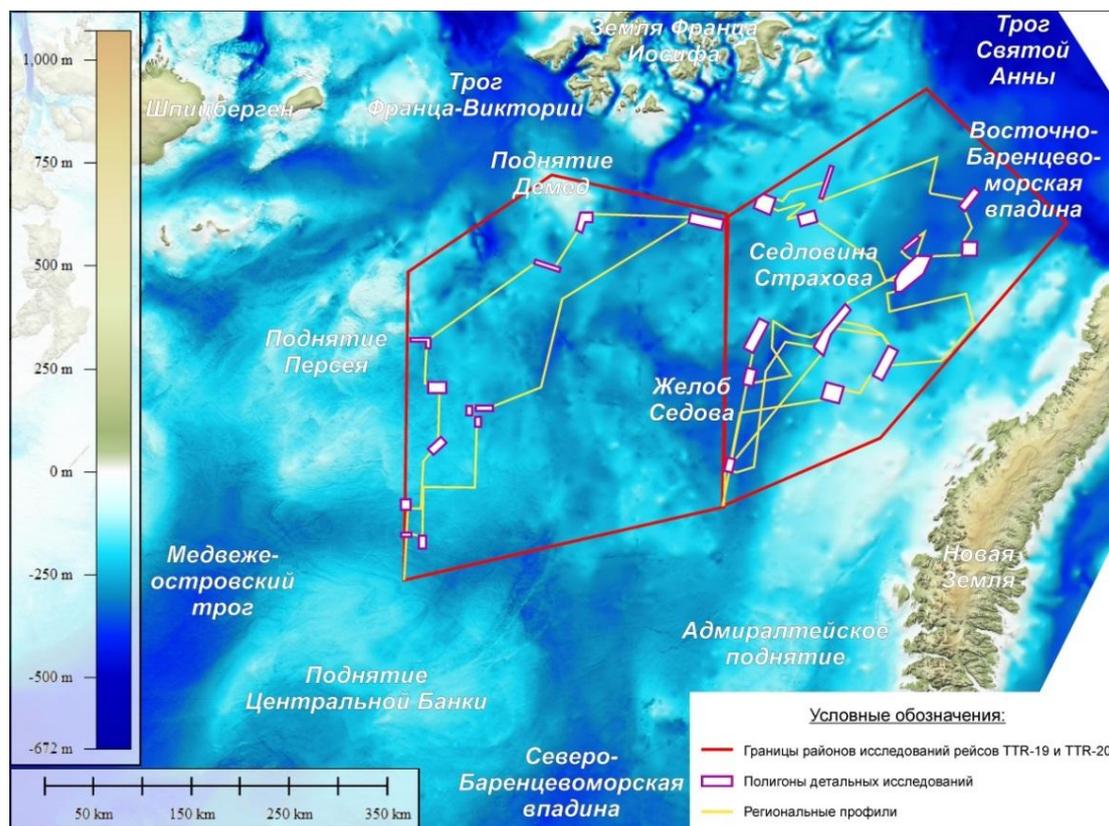


Рис. 1. Расположение районов работ геолого-геофизических рейсов ТТР-19 и ТТР-20

В вопросах изучения ледниковых форм рельефа наиболее важную роль играли геофизические методы, включавшие непрерывное сейсмоакустическое профилирование с электроискровым источником, картирование придонных отложений профилографом и исследование рельефа морского дна с использованием многолучевого эхолота. В результате была построена детальная цифровая модель рельефа дна с ячейкой 15x15 метров на площади около 8000 км<sup>2</sup>, анализ которой позволил закартировать более 2000 локальных форм донного рельефа. Идентификация выделенных структур проводилась путём сравнения с аналогичными формами рельефа на суше и в хорошо изученной норвежской части Баренцева моря. Благодаря этому, большая часть обнаруженных форм рельефа была идентифицирована как гляциальные структуры: мегамасштабная ледниковая линейность (MSGs), морены отступления (retreat moraine ridges), призмы отлегания (grounding-zone wedges), туннельные долины (tunnel valleys), озы (eskers), структуры «hill-hole pairs» (Рис. 2).

**Результаты наблюдений.** В связи со слабой геофизической изученностью северо-восточной части Баренцева моря, реконструкции конфигурации и движения ледового покрова, в основном, отталкиваются от мегамасштабных форм рельефа, таких как Восточно-Баренцевоморская впадина, трог Святой Анны, желоб Седова и другие [Polyak et al., 1997; Patton et al., 2015 и др.]. В связи с этим, детальное геоморфологическое картирование позволяет углубить понимание истории развития евразийского ледового щита на его северо-восточной периферии. Анализ распространения и ориентации ледниковых форм рельефа позволяет определить направление течений ледниковых потоков во время последнего ледникового максимума и последующей дегляциации.

Наиболее распространённой закартированной формой гляциального рельефа, позволяющей определить направление течения ледниковых потоков, является мегамасштабная ледниковая линейность (mega-scale glacial lineation – MSGL). Данные структуры формируются при деформировании мягких подледниковых осадочных накоплений под действием налегающего, активного и быстро движущегося ледникового потока. Они образуют группы протяжённых параллельных линейных гряд и ложбин, ориентированных в направлении

течения ледниковых потоков, что позволяет провести реконструкцию движения ледника (Рис. 2А, 2В) [King et al., 2009; Spangolo et al., 2014].

Другими распространёнными в изученном районе формами рельефа являются морены отступления (retreat moraines), представляющие собой осадочные валы слабоизвилистой формы (Рис. 2А, 2В). Они формируются на внешней кромке ледника при кратковременном сезонном наступлении ледникового фронта на фоне общей дегляциации. Таким образом, моренные гряды ориентированы перпендикулярно направлению течения ледникового потока и являются хорошими индикаторами развития ледовых покровов в период таяния ледника [Ottesen and Dowdeswell, 2006; Dowdeswell et al., 2007].

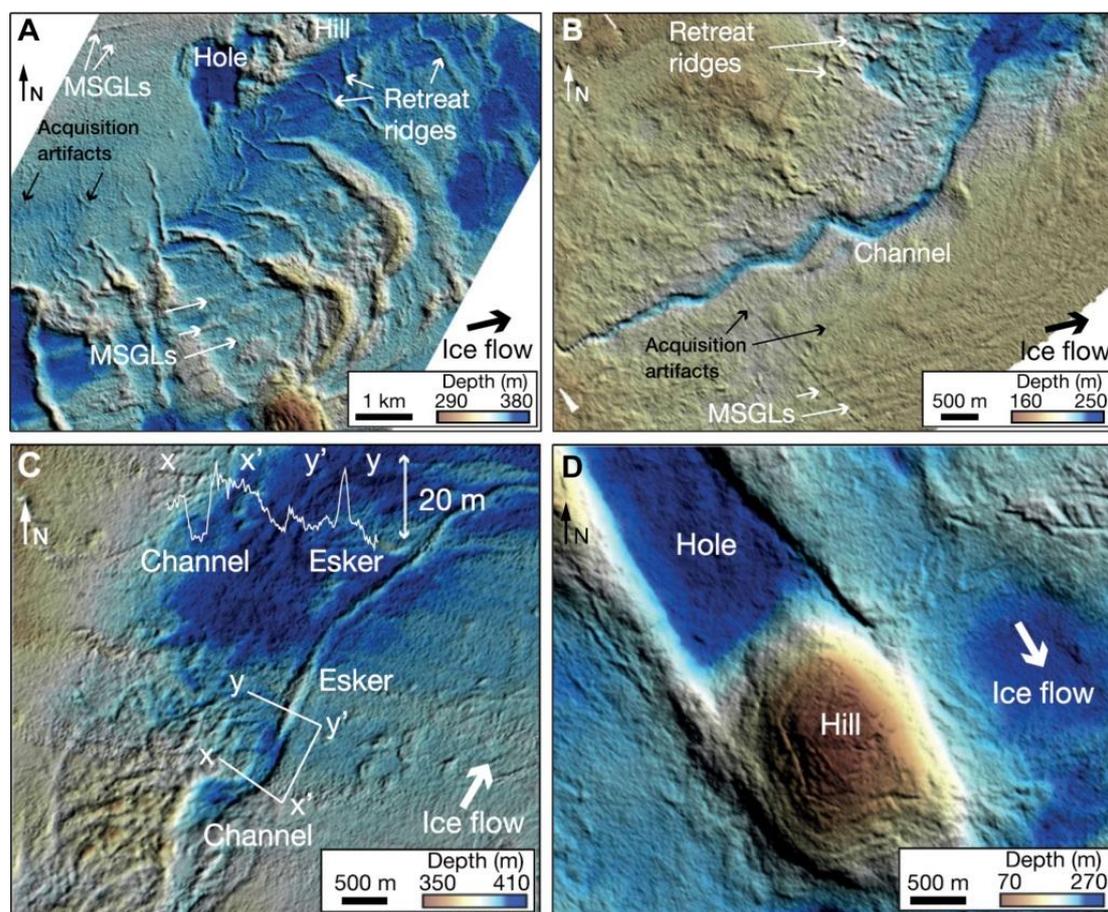


Рис. 2. Примеры форм рельефа, идентифицированных на батиметрических данных, полученных в рейсах TTR-19 и TTR-20 [Dowdeswell et al., 2021]

Аналогично, направление движения ледовых потоков можно предположить по ориентации туннельных долин (Рис. 2В) и озов (Рис. 2С), которые формируются в результате воздействия напорных талых вод на подледниковый субстрат или толщу самого льда. Данные структуры ориентированы в генеральном плане сонаправленно максимальному градиенту давления толщ ледника [Livingstone et al., 2016; Bjarnadóttir et al., 2017].

На некоторых участках были обнаружены парные экзарационно-аккумулятивные структуры (hill-hole pairs), которые предположительно формируются при движении утонённого ледникового потока по подстилающим отложениям с неравномерным трением или промерзанием [Ottesen et al., 2005; Dowdeswell, 2016; Winsborrow et al., 2016]. По взаимному расположению депрессии и возвышенности обычно можно легко установить направление движения ледникового потока (Рис. 2D).

**Обсуждение результатов.** Анализ распространения и ориентации обнаруженных ледниковых форм рельефа позволил составить схему направлений течений ледниковых потоков для каждого локального участка исследований (Рис. 3А). Обобщение данных

результатов привело к созданию модели течений ледниковых потоков в дегляциале на территории всего северо-восточного сектора Баренцевоморского шельфа (Рис. 3В).

Один из крупных палеогеографических выводов по результатам данного исследования состоит в том, что между Землёй Франца Иосифа и Новой Землёй отсутствовал потенциально возможный самостоятельный ледовый купол, который мог растекаться с региональной возвышенности седловины Страхова в направлении прилегающих впадин Седова и Восточно-Баренцевоморской. В этой области существовал поток, который из желоба Седова перетекал через седловину Страхова в северо-восточном направлении и спускался в Восточно-Баренцевоморскую впадину, где, вероятно, соединялся с ледовым потоком, текущим на север вдоль жёлоба Святой Анны.

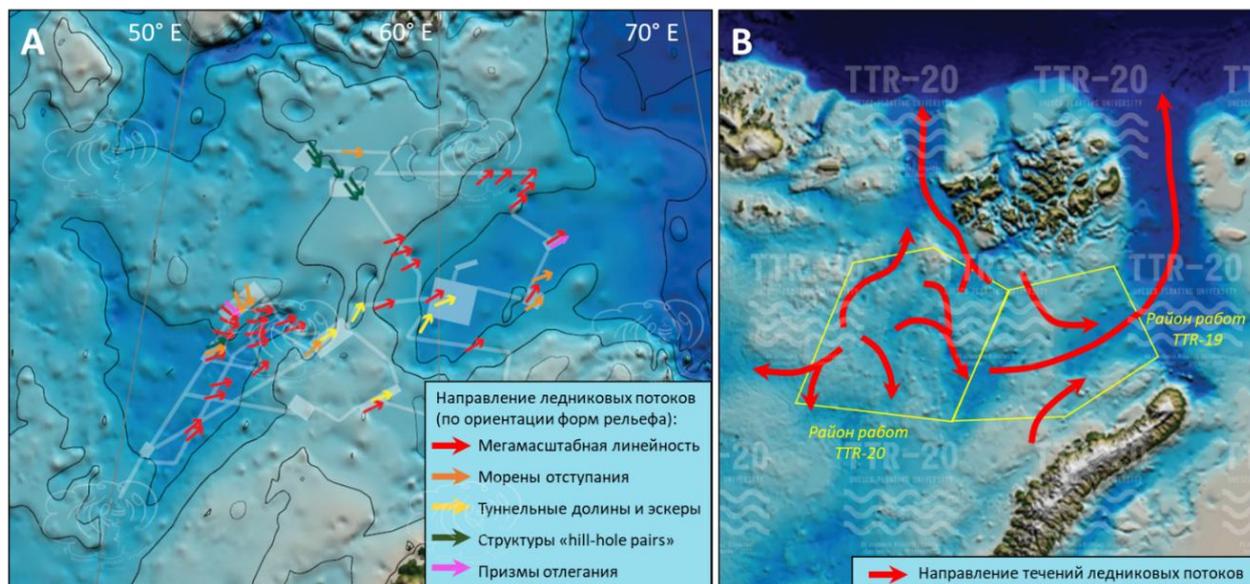


Рис. 3. Схемы направлений течений ледниковых потоков: (А) схема, основанная на ориентации различных гляциальных форм рельефа, закартированных в рейсе ТТР-19 [Dowdeswell et al., 2021]; (В) реконструкция на основе обобщённых данных рейсов ТТР-19 и ТТР-20

Другим важным выводом является обнаружение следов течения ледника в радиальных направлениях от юго-восточной части поднятия Персея, что свидетельствует о наличии в этом районе остаточного ледникового купола в период дегляциала. Полученные данные позволили локализовать центр этого купола с точностью до первых десятков километров, что для морских условий сделано впервые в Мире.

Вывод о расположении остаточного ледникового купола подтверждается также данными изучения мощностей голоценовых морских осадков, выполненного в экспедиции с использованием профилографа. В области обнаруженного палео-ледового купола морские осадки практически отсутствуют. Маломощный слой, представленный алевритистыми глинами, появляется на периферии поднятия Персея, и его мощность увеличивается при удалении от поднятия. Это наблюдение позволяет сделать предположение, что юго-восточная часть поднятия Персея освободилась от ледникового покрова позже окружающих участков.

**Заключение.** Большой объём данных, собранных и проанализированных в рейсах ТТР-19 и ТТР-20, впервые позволил так детально изучить морфологию дна северо-восточной части Баренцевоморского шельфа и обнаружить неопровержимые свидетельства развития покровного ледника на данной территории. Закартированные гляциальные формы рельефа позволили провести реконструкцию ледниковых потоков поздне-валдайского оледенения в ранее малоизученном районе.

Также, существование остаточного ледникового купола на юго-восточной части поднятия Персея является важным открытием, позволяющим уточнить и дополнить существующие модели развития баренцевоморского ледникового покрова. «Обнаруженный» в экспедиции

TTR-20 купол не отражен в наиболее известных моделях [Svendsen *et al.*, 2004; Hughes *et al.*, 2016; Patton *et al.*, 2017]. Новые данные должны привести к пересмотру и корректировке представлений об эволюции четвертичного оледенения в этой части Арктики.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Bjarnadóttir L., Winsborrow M., Andreassen K. Deglaciation of the central Barents Sea // *Quaternary Science Reviews*. 2014. Vol. 92. P. 208-226. doi:10.1016/j.quascirev.2013.09.012
- Bjarnadóttir L.R., Winsborrow M.C.M., Andreassen K. Large subglacial meltwater features in the central Barents Sea // *Geology*. 2017. Vol. 45. Is. 2. P. 159-162. doi:10.1130/G38195.1
- Dowdeswell J.A., Ottesen D., Rise L., Craig J. Identification and preservation of landforms diagnostic of past icesheet activity on continental shelves from threedimensional seismic evidence // *Geology*. 2007. Vol. 35. Is. 4. P. 359–362. doi:10.1130/G23200A.1
- Dowdeswell J., Canals M., Jakobsson M., Todd B., Dowdeswell E., Hogan K.A. The variety and distribution of submarine glacial landforms and implications for ice-sheet reconstruction // *Geological Society, London, Memoirs*. 2016. Vol. 46. P. 519-552. doi:10.1144/M46.183.
- Dowdeswell J., Montelli A., Akhmanov G., Solovyeva M., Terekhina Y., Mironyuk S., Tokarev M. Late Weichselian ice-sheet flow directions in the Russian northern Barents Sea from high-resolution imagery of submarine glacial landforms // *Geology*. 2021. Vol. 49. P. 1484-1488. doi:10.1130/G49252.1
- Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction // *Boreas*. 2016. Vol. 45. Is. 1. P. 1–45. doi: 10.1111/bor.12142
- Jakobsson M., Andreassen K., Bjarnadóttir L.R., Dove D., Dowdeswell J.A., England J.H., Funder S., Hogan K., Ingólfsson Ó., Jennings A., Krog-Larsen N., Kirchner N., Landvik J.Y., Mayer L., Mikkelsen N., Möller Per., Niessen F., Nilsson J., O'Regan M., Polyak L., Nørgaard Petersen N., Stein R. Arctic ocean glacial history // *Quaternary Science Reviews*. 2014. Vol. 92. P. 40-67. doi:10.1016/j.quascirev.2013.07.033
- King E.C., Hindmarsh R.C., Stokes C.R. Mega-scale glacial lineations beneath a West Antarctic ice stream // *Nature Geoscience*. 2009. Vol. 2. P. 585-588. doi:10.1038/ngeo581
- Livingstone S. J., Utting D.J., Ruffell A., Clark C.D., Pawley S., Atkinson N., Fowler A.C., Discovery of relict subglacial lakes and their geometry and mechanism of drainage // *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. P. 1–9. doi:10.1038/ncomms11767
- Ottesen D., Dowdeswell J.A., Rise L. Submarine landforms and the reconstruction of fast-flowing ice streams within a large Quaternary ice sheet: The 2500-km-long Norwegian-Svalbard margin (57-80°N) // *Geological Society of America Bulletin*. 2005. Vol. 117. P. 1033-1050. doi:10.1130/B25577.1
- Ottesen D., Dowdeswell J.A. Assemblages of submarine landforms produced by tidewater glaciers in Svalbard // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2006. Vol. 111. doi:10.1029/2005JF000330
- Patton H., Andreassen K., Bjarnadóttir L., Dowdeswell J.A., Winsborrow M., Noormets R., Polyak L., Auriac A., Hubbard A. Geophysical constraints on the dynamics and retreat of the Barents Sea Ice Sheet as a palaeo-benchmark for models of marine ice-sheet deglaciation // *Reviews of Geophysics*. 2015. Vol. 53. P. 1051-1098. doi:10.1002/2015RG000495
- Patton H., Hubbard A., Andreassen K., Auriac A., Whitehouse P., Stroeven A., Shackleton C., Winsborrow M., Heyman J., Hall A. Deglaciation of the Eurasian ice sheet complex .. *Quaternary Science Reviews*. 2017. Vol. 169. P. 148-172. doi:10.1016/j.quascirev.2017.05.019.
- Polyak L., Forman S.L., Herlihy F.A., Ivanov G., Krinitsky P. Late Weichselian deglacial history of the Svyataya (Saint) Anna Trough, northern Kara Sea, Arctic Russia // *Marine Geology*. 1997. Vol. 143. P. 169–188. doi:10.1016/S0025-3227(97)00096-0
- Spagnolo M., Clark C.D., Ely J.C., Stokes C.R., Anderson J.B., Andreassen K., Graham A.G., King E.C. Size, shape and spatial arrangement of megascale glacial lineations from a large and

diverse dataset // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2014. Vol. 39. Is. 11. P. 1432–1448. doi:10.1002/esp.3532

*Svendsen J., Alexanderson H., Astakhov V., Demidov I., Dowdeswell J., Funder S., Gataullin V., Henriksen M., Hjort C., Houmark-Nielsen M., Hubberten H.-W., Ingólfsson Ó., Jakobsson M., Kjaer K., Larsen E., Lokrantz H., Lunkka J., Lyså A., Mangerud J., Stein R.* Late Quaternary ice sheet history of Northern Eurasia // *Quaternary Science Reviews*. 2004. Vol. 23. Is. 11–13. P. 1229–1271. doi:10.1016/j.quascirev.2003.12.008

*Winsborrow M., Andreassen K., Hubbard A., PlazaFaverola A., Gudlaugsson E., Patton H.* Regulation of ice stream flow through subglacial formation of gas hydrates // *Nature Geoscience*. 2016. Vol. 9. P. 370–374. doi:10.1038/ngeo2696

## **NEW IMPORTANT IMPRINTS OF THE WEICHSELIAN GLACIATION RECORDED IN THE NORTH-EASTERN BARENTS SEA DURING THE TTR-19 AND TTR-20 CRUISES**

*<sup>1</sup>Solovyeva M.A., <sup>1</sup>Akhmanov G.G., <sup>2</sup>Montelli A.I.*

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; marina-sol@yandex.ru

<sup>2</sup> Scott Polar Research Institute, Cambridge, UK; aim39@cam.ac.uk

Detailed geomorphological studies using various geophysical methods were carried out during the TTR19 and TTR-20 cruises in the Northeastern Barents Sea shelf. That allowed us detecting and mapping a wide variety of glacial landforms. Their discovery is an irrefutable evidence of the ice-sheet development in this area. The analysis of the distribution and orientation of glacial landforms allowed us for the first time in this region creating a detailed reconstruction of ice-sheet flows directions in the Late Weichselian, which significantly clarified the existing models of the glaciation.

Keywords: *Barents Sea, multi-beam echosounding, seismic and acoustic profiling, glacial landforms, Weichselian glaciation, ice dome*