

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-361-367



РЕЛИКТОВЫЕ ПОДЛЕДНИКОВЫЕ ДРЕНАЖНЫЕ СИСТЕМЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

✉ Соловьева М.А.¹, Монтелли А.И.², Ахманов Г.Г.¹, Томасенко С.В.¹, Косоватова Т.А.¹

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Университетский колледж Лондона, Лондон, Великобритания

✉ marina-sol@yandex.ru

В работе приводятся результаты изучения одной из крупнейших в мире реликтовой подледниковой дренажной системы, расположенной в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа, впервые обнаруженной и закартированной в экспедициях по программе TTR «Training-through-Research (Обучение-через-исследования)» в 2020-2024 гг. Описаны многочисленные туннельные долины, озы, подледниковые озёра и более сложные флювиогляциальные формы различной морфологии, составляющие, по всей видимости, единую систему наследуемого развития. Проведён обширный донный пробоотбор в разных частях системы, подтвердивший флювиогляциальный генезис обнаруженных форм рельефа. Установлено длительное развитие дренажной системы с периодическими изменениями направления и интенсивности дренирования. Наличие обширной системы подледникового дренажа противоречит господствующим гипотезам о холодных и безводных условиях во время последнего оледенения в данном регионе и требует пересмотра существующих численных моделей.

Ключевые слова: *Баренцево море, Валдайское оледенение, подледниковые дренажные системы, многолучевое эхолотирование*

Введение. Значимыми событиями в истории четвертичного развития Баренцевоморского шельфа были периодические расширения и уменьшения Евразийского ледникового щита, который в максимумы своего развития покрывал большую часть шельфов северной Европы, в том числе Баренцева моря [Hugles et al., 2016; Patton et al., 2016; Svendsen et al., 2004; и др.]. Восточный (российский) сектор Баренцевоморского шельфа существенно менее изучен по сравнению с западным (норвежским), где обнаружены многочисленные свидетельства развития оледенения и выполнены детальные палеоклиматические реконструкции [e.g. Bjarnadóttir et al., 2014; Jakobsson et al., 2014; Patton et al., 2015]. Это обуславливает актуальность получения новых достоверных сведений о строении четвертичного осадочного разреза и морфологии дна восточного Баренцевоморья, поиска свидетельств развития ледника на шельфе или доказательств его отсутствия.

Одним из интересных вопросов ледниковой истории является деятельность талых вод и формирование подледниковых систем дренажа, которые регулируют движение и стабильность ледников. В экспедиции программы «Training-through-Research» (TTR-19) в 2020 г. в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа были обнаружены элементы таких реликтовых систем [Dowdeswell et al., 2021] и впервые выдвинуто предположение о развитии на этой территории единой обширной дренажной сети. Последующие экспедиции 2021-2024 года в этот же регион были нацелены на расширение области исследований и детализации закартированных фрагментов подледниковых каналов. В данном исследовании приводятся обобщённые результаты изучения реликтовых систем подледникового дренажа в северо-восточной части Баренцева моря.

Данные и методы. В экспедициях программы TTR реализуется широкий комплекс методов исследований геофизической, геологической, геохимической, гидрогеологической, микробиологической, гидрофизической направленности. Работы проводились на НИС «Академик Николай Страхов» (2020, 2021 гг.) и НИС «Академик Борис Петров» (2024 г.).

Съёмка рельефа морского дна и построение трёхмерной модели (с ячейкой 5-15 м) выполнялась с использованием штатных судовых многолучевых эхолотов Reson SeaBat T50-R ER (число лучей: 1024, сигнал: 150-420 кГц), Reson SeaBat 8111 (число лучей: 101, сигнал: 100 кГц), Reson SeaBat 7150 (число лучей: 256, сигнал: 12 кГц). Для изучения строения верхней части разреза использовались акустические профилографы Edgetech 3300 (сигнал: ЛЧМ, 2-16 кГц) и Parasound P70 (сигнал: ЛЧМ, 0.5-7 кГц, 18-24 кГц, 37-42 кГц), а также комплекс для проведения малоглубинных высокоразрешающих сейсмоакустических исследований SplitMultiSeis с электроискровым источником «спаркер» (сигнал: 300-700 Гц). Опробование донных осадков осуществлялось прямоточной гравитационной (ударной) трубкой длиной 3.5 м с последующим фотодокументированием, литологическим описанием, измерением физико-механических и гидрогеохимических параметров отобранных отложений и подготовкой проб для дальнейших газогеохимических, минералогических, гранулометрических и прочих анализов минерального скелета и порового флюида.

За три экспедиции программы TTR (TTR-19, TTR-20 и TTR-23) накоплен внушительный объём геолого-геофизических материалов в северо-восточной части Баренцева моря (рис. 1), позволивший закартировать и идентифицировать несколько тысяч форм рельефа ледникового генезиса, в том числе были обнаружены свидетельства деятельности талых вод, выраженные в виде фрагментов туннельных долин и озов, которые формируются в результате воздействия напорных талых вод на подледниковый субстрат или толщу самого льда [e.g. Livingstone et al., 2016; Bjarnadóttir et al., 2017] (рис. 2).

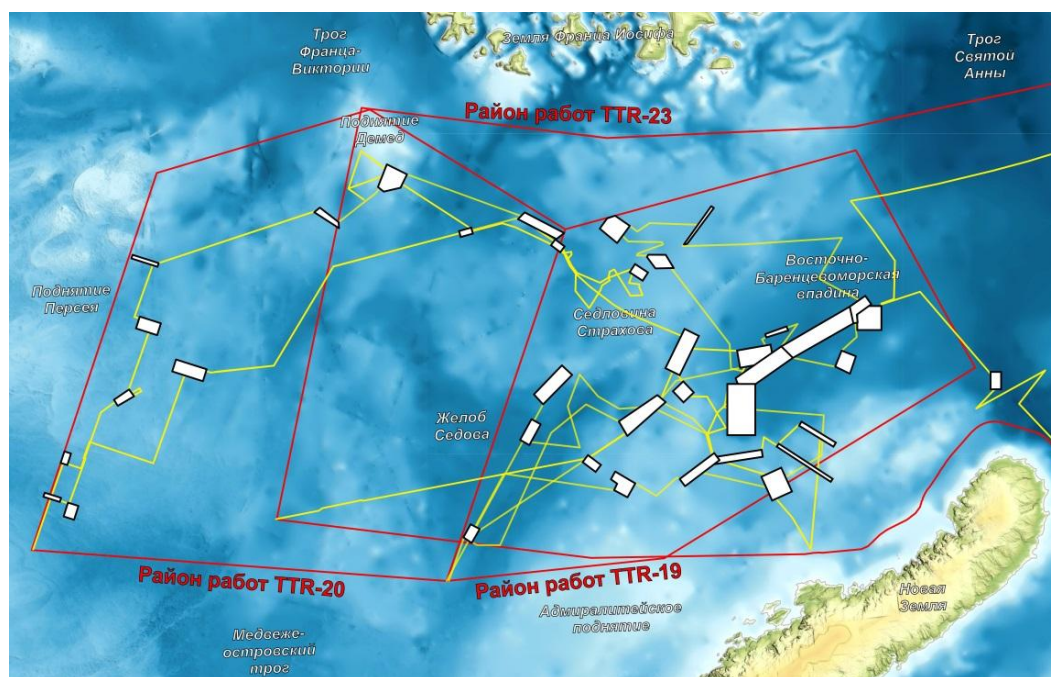


Рис.1. Схема расположения полигонов детальных геолого-геофизических исследований (белые многоугольники) и соединяющих их региональных профилей (желтые линии) в рейсах TTR-19, TTR-20 и TTR-23

Результаты. В 2020 г. в северо-восточной части Баренцева моря были обнаружены и закартированы фрагменты четырёх туннельных долин, расположенных в пределах Восточно-Баренцесоморской впадины и на седловине Страхова (рис. 1). В ходе экспедиции 2024 г. были расширены полигоны предыдущих исследований, в результате чего удалось соединить обнаруженные ранее разрозненные элементы дренажной системы в единую сеть. Система каналов простирается более чем на 170 км, что делает обнаруженную подледниковую дренажную систему одной из крупнейших в мире. Также,

были закартированы ещё три более мелкие системы туннельных долин протяжённостью 17 км, 30 км и более чем 95 км.

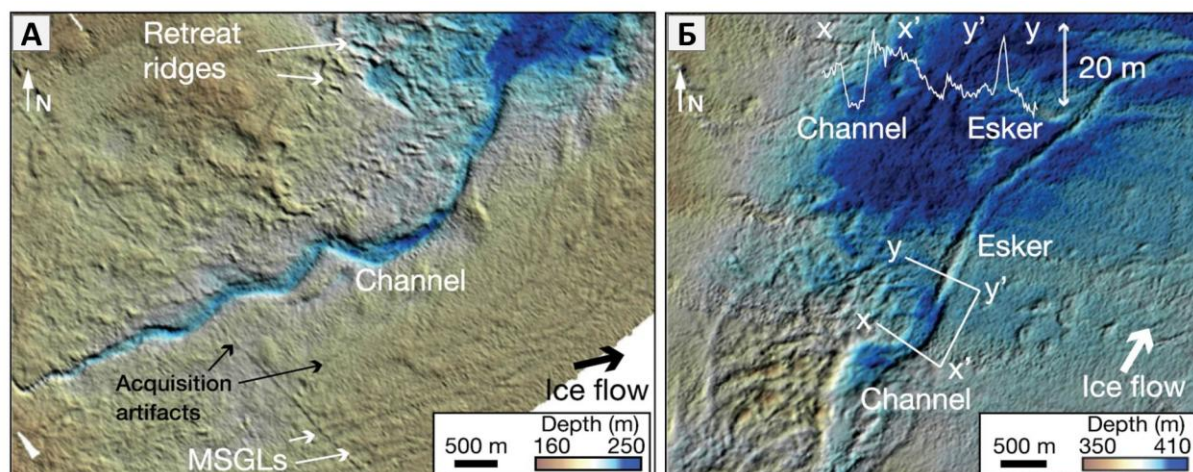


Рис. 2. Фрагменты реликтовой подледниковой дренажной системы, обнаруженной в восточном Баренцевом море: А – туннельная долина (channel); Б – оз (esker) по [Dowdeswell et al., 2021].

Детальное картирование флювиогляциальных форм рельефа показало, что дренажные системы имеют сложное строение и представляют собой систему подледниковых озёр, связанных между собой туннельными долинами и озами сложной конфигурации. Морфология обнаруженных элементов весьма разнообразна. Глубина вреза туннельных долин варьирует от первых метров до 80 м, ширина – от 30 м до 4 км. Высота озов изменяется от первых метров до 25 м, а их ширина – от 140 м до 800 м. Подледниковые резервуары (озёра) могут достигать в диаметре 13 км.

В плане туннельные долины и озы также весьма разнообразны, представляют собой как прямолинейные, так и сильноизвилистые формы рельефа. Зафиксированы свидетельства латеральной миграции долин – их разветвления, пересечения, параллельное расположение на близком расстоянии. Также были прослежены наложения туннельных долин на оз (рис. 3Б) и вложение озов друг в друга (рис. 3А).

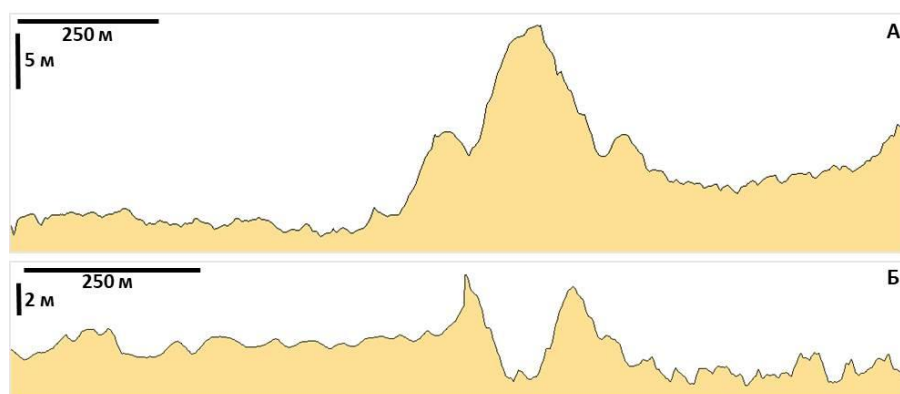


Рис. 3. Профили рельефа через оз (А) и канал (Б) сложной конфигурации

В обнаруженных дренажных системах выделяются крупные понижения, предположительно представляющие собой подледниковые озёра. Интересно отметить, что в этих местах были обнаружены группы протяжённых небольших гряд, параллельных основному каналу/озу. Генезис этих структур пока неясен, но скорее всего они свидетельствуют о периодических изменениях в интенсивности дренирования и, как следствие, изменении морфологических параметров подледниковых резервуаров.

Все обнаруженные типы форм рельефа были опробованы. В керне отобранного осадка на глубине более 1 м под тощей отчётливо выделяющихся морских голоценовых

пелитов наблюдается мощный слой с горизонтальным чередованием прослоев сильно обводнённого песка мощностью от первых миллиметров до 12 см (рис. 4). Данный тип разреза подтверждает флювиогляциальную природу обнаруженных форм рельефа, в том числе серий валов в подледниковых озёрах.

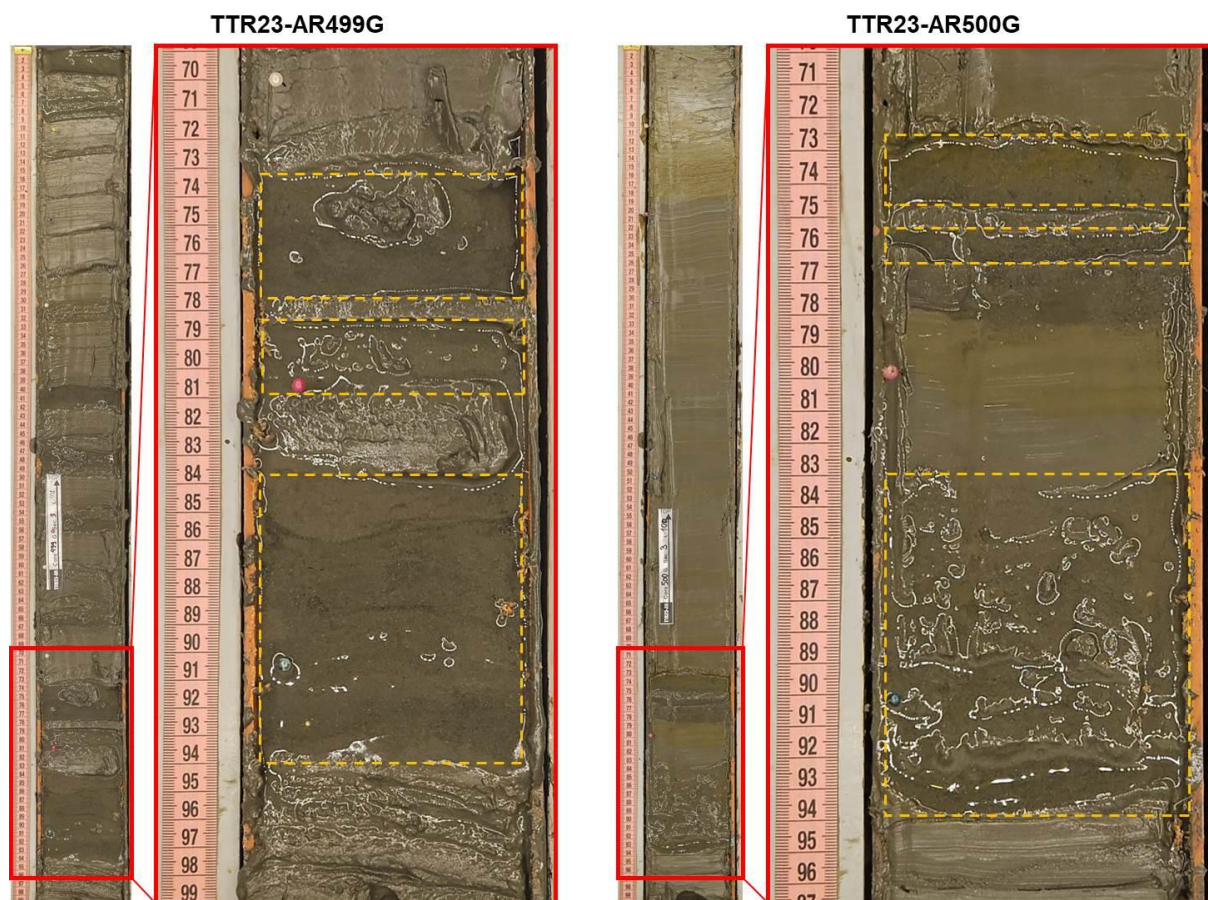


Рис. 4. Фотографии кернов донных осадков станций TTR23-AR499G и TTR23-AR500G, отобранных в пределах вала в подледниковом озере (слева) и в тальвеге туннельной долины (справа). Желтыми прямоугольниками выделены песчаные прослои на увеличенных фрагментах фотографий

Обсуждение результатов. Обнаружение большого количества туннельных долин, озов и подледниковых резервуаров свидетельствует о широком развитии подледниковой дренажной системы на северо-восточной части Баренцевоморского шельфа. Вероятно, система развивалась длительное время, о чём свидетельствуют как её гигантские размеры, так и зафиксированные многочисленные признаки латеральной миграции долин и озов, их пересечения и вложения друг в друга. Широкая вариативность морфологических параметров закартированных структур указывает на изменения в направлениях и интенсивности дренирования.

Северо-восточный сектор Баренцева моря характеризуется достаточно скудным объёмом натурных данных, в связи с чем существующие модели оледенения в этом регионе носят гипотетический характер, а результаты моделирования могут не в достаточной степени отражать действительность. Так, согласно существующим численным моделям, во время последнего оледенения в исследуемой части Баренцева моря предсказывается «холодный» ледниковый покров, т.е. отрицательные температуры в подошве ледника и верхней части субстрата [Patton et al., 2016]. Обнаружение крупных реликтовых подледниковых дренажных систем, сформировавшихся на поздней стадии последнего оледенения, вступает в противоречие с расчётными холодными, практически безводными, подледниковыми условиями. Кроме того, в этом же районе были

обнаружены крупные провинции гляциотектонических пар [Dowdeswell et al., 2021; Montelli et al., 2023; Montelli et al., 2024], для формирования которых, согласно существующим представлениям, требуется наличие «тёплых» секторов ледникового палео-покрова [Serov et al., 2015; Patton et al., 2016, 2022]. Таким образом, требуется пересмотр современных представлений об условиях и корректировка математических моделей, рассчитывающих температурный режим оледенения.

Заключение. Результаты исследований демонстрируют, что в северо-восточном секторе Баренцевоморского шельфа длительное время развивалась подледниковая дренажная система, характеризовавшаяся периодическими изменениями направления и интенсивности дренирования на протяжении позднего плейстоцена.

Обнаружение крупнейшей реликтовой системы подледникового дренажа в северо-восточной части Баренцева моря является важным открытием, переворачивающим текущие представления об эволюции ледникового покрова и требующим пересмотр численных палеоклиматических моделей.

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., 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

Livingstone S.J., Utting D.J., Ruffell A., Clark C.D., Pawley S., Atkinson N., Fowler A.C., 2016. Discovery of relict subglacial lakes and their geometry and mechanism of drainage // Nature Communications. 2016. Vol. 7, 11767. doi:10.1038/ncomms11767

Montelli A., Solovyeva M., Akhmanov G., Mazzini A., Piatilova A., Bakay E., Dowdeswell J.A. The geomorphic record of marine-based ice dome decay: Final collapse of the Barents Sea ice sheet // Quaternary Science Reviews. 2023. Vol. 303, 107973. doi: 10.1016/j.quascirev.2023.107973

Montelli A., Solovyeva M., Akhmanov G. Extensive glacitectonism and rapid deglacial fluid expulsion in the northeastern Barents Sea // Communications earth & environment. 2024. Vol. 5, 353. doi: 10.1038/s43247-024-01512-6

Patton H., Hubbard A., Andreassen K., Winsborrow M., Stroeve A.P. The build-up, configuration, and dynamical sensitivity of the Eurasian ice-sheet complex to Late Weichselian climatic and oceanic forcing // Quaternary Science Reviews. 2016. Vol. 153. P. 97-121. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.10.009

Patton H., Hubbard A., Heyman J., Alexandropoulou N., Lasabuda A.P.E., Stroeve A.P., Hall A. M., Winsborrow M., Sugden D. E., Kleman J., Andreassen K. The extreme yet transient nature of glacial erosion // Nature Communications. 2022. Vol. 13, 7377. doi: 10.1038/s41467-022-35072-0

Serov P., Portnov A., Mienert J., Semenov P., Ilatovskaya P. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost // Journal of

Geophysical Research: Earth Surface. 2015. Vol. 120. Is. 8. P. 1515-1529. doi: 10.1002/2015JF003467

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

RELICT SUBGLACIAL DRAINAGE SYSTEMS OF THE NORTH-EASTERN BARENTS SEA

Solovyeva M.A.¹, Montelli A.I.², Akhmanov G.G.¹, Tomasenko S.V.¹, Kosovatova T.A.¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² University College London, London, UK

This paper presents the results of the study of one of the world's largest relict subglacial drainage system located in the northeastern Barents Sea shelf, discovered and mapped in the expeditions of the TTR «Training-through-Research» programme in 2020-2024. Numerous tunnel valleys, lakes, subglacial lakes and more complex fluvioglacial forms of various morphologies have been determined. Extensive bottom sampling was carried out in different parts of the system and the fluvioglacial genesis of the discovered landforms was confirmed. The long-term development of the drainage system with periodic changes in the direction and intensity of drainage has been established. The presence of an extensive subglacial drainage system contradicts the prevailing hypotheses about cold-based ice sheet and waterless conditions during the last glaciation in this region and requires a revision of existing numerical models.

Keywords: *Barents Sea, Weichselian glaciation, subglacial drainage systems, multi-beam echosounding*

REFERENCES:

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., 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

Livingstone S.J., Utting D.J., Ruffell A., Clark C.D., Pawley S., Atkinson N., Fowler A.C., 2016. Discovery of relict subglacial lakes and their geometry and mechanism of drainage // Nature Communications. 2016. Vol. 7, 11767. doi:10.1038/ncomms11767

Montelli A., Solovyeva M., Akhmanov G., Mazzini A., Piatilova A., Bakay E., Dowdeswell J.A. The geomorphic record of marine-based ice dome decay: Final collapse of the Barents Sea ice sheet // Quaternary Science Reviews. 2023. Vol. 303, 107973. doi: 10.1016/j.quascirev.2023.107973

Montelli A., Solovyeva M., Akhmanov G. Extensive glaciectonism and rapid deglacial fluid expulsion in the northeastern Barents Sea // Communications earth & environment. 2024. Vol. 5, 353. doi: 10.1038/s43247-024-01512-6

Patton H., Hubbard A., Andreassen K., Winsborrow M., Stroeven A.P. The build-up, configuration, and dynamical sensitivity of the Eurasian ice-sheet complex to Late Weichselian climatic and oceanic forcing // Quaternary Science Reviews. 2016. Vol. 153. P. 97-121. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.10.009

Patton H., Hubbard A., Heyman J., Alexandropoulou N., Lasabuda A.P.E., Stroeve A.P., Hall A. M., Winsborrow M., Sugden D. E., Kleman J., Andreassen K. The extreme yet transient nature of glacial erosion // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13, 7377. doi: 10.1038/s41467-022-35072-0

Serov P., Portnov A., Mienert J., Semenov P., Ilatovskaya P. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2015. Vol. 120. Is. 8. P. 1515-1529. doi: 10.1002/2015JF003467

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