

ГЛЯЦИОТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

¹Соловьева М.А., ¹Ахманов Г.Г., ²Монтелли А.И.

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

² Институт полярных исследований имени Скотта, Кембридж, Великобритания

В ходе экспедиций TTR-19 и TTR-20 в Баренцевом море впервые для российских шельфов были обнаружены и детально изучены комплексом геолого-геофизических методов поля гляциотектонических структур («hill-hole pairs»). Их обнаружение является неопровержимым свидетельством развития покровного оледенения на данной территории, а анализ их характеристик позволяет делать важные выводы о конфигурации и динамике ледовых потоков. Установлено наличие остаточных ледниковых куполов на поднятии Персея и Земле Франца-Иосифа и определено направление течения ледниковых потоков в северной части Баренцевоморского шельфа. Различия в морфологии и характере распространения обнаруженных гляциотектонических структур свидетельствуют о различных механизмах их образования, предположительно связанных с формированием подледниковых газовых гидратов и зоны вечной мерзлоты.

Ключевые слова: *Баренцево море, многолучевое эхолотирование, сейсмоакустическое профилирование, гляциотектонические структуры, Валдайское оледенение*

Введение. Ледниковые формы рельефа, в том числе сформированные гляциотектоническими процессами, изучаются уже не одно столетие. Основоположником идей о способности ледников вызывать нарушения в залегании пород считается датский геолог F. Johnstrup [Кригер, 1972], который изучал связь дислокаций меловых пород с ледниковым напором на островах Мён и Рюген [Johnstrup, 1874, 1875]. Сам термин «гляциотектоника» («glacial tectonic») появился позднее и впервые был использован в работе [Slater, 1929]. С этого времени появляются многочисленные работы по данной теме, которые позднее были обобщены в отечественных и зарубежных монографиях [Левков, 1980; Aber and Ber, 2007].

Гляциотектонические процессы широко разнообразны по характеру проявления, однако в данной работе мы будем рассматривать только один тип структур, который в зарубежной литературе именуется «hill-hole pairs» и представляет собой сопряжённую пару отрицательной и положительной форм рельефа одинакового объёма. При этом возвышенность расположена ниже по течению ледника от связанной с ней депрессией [Bluemle and Clayton, 1984]. Подобные объекты, в основном, наблюдались на суше [Moran et al., 1980; Bluemle and Clayton, 1984; Aber and Ber, 2007; Livingstone and Clark, 2016; и др.], однако в последние десятилетия с развитием подводных методов исследований, в особенности, многолучевого эхолотирования, был открыт ряд структур на континентальных шельфах, преимущественно, в Норвежском море [Sættem, 1990, Ottesen et al., 2005; и др.]. Кроме того, структуры «hill-hole pairs» были обнаружены в юго-западной части Баренцева море [Rise et al., 2016; Winsborrow et al., 2016; и др.], в окрестностях Шпицбергена [Hogan et al., 2016] и у берегов Антарктиды [Klages et al., 2013; Larter et al., 2019].

Несмотря на достаточно широкое распространение структур «hill-hole pairs», первые свидетельства их присутствия на российской акватории были обнаружены лишь в 2016 г. при батиметрической съёмке отдельных участков в северо-восточной части Баренцева моря коммерческими организациями [Миرونюк и Иванова, 2018]. Первые комплексные геолого-геофизические научные исследования этих структур, а также открытия целого ряда подобных форм рельефа в северной части Баренцева моря состоялись в международных мультидисциплинарных научных экспедициях Плавучего Университета ЮНЕСКО-МГУ по программе «Training-through-Research» (TTR-19 и TTR-20) в 2020-2021

гг. [Dowdeswell et al., 2021; Соловьева и др., 2021]. Полученные материалы легли в основу данной работы.

Данные и методы. Материалы исследования были собраны в ходе двух научных экспедиций Плавучего Университета ЮНЕСКО-МГУ ТТР-19 и ТТР-20 на борту НИС «Академик Николай Страхов». На небольших полигонах общей площадью около 8000 км² при помощи многолучевых эхолотов Reson SeaBat 7150 (12 кГц, 256 лучей, угол диаграммы направленности луча 2° x 2°) и Reson SeaBat 8111 (100 кГц, 101 лучей, угол диаграммы направленности луча 1,5° x 1,5°) были получены высокоразрешающие батиметрические данные.

Для изучения внутренней структуры обнаруженных форм рельефа и строения придонных осадков проводилась двухчастотная сейсмоакустическая съёмка с электроискровым источником (центральная частота 300 Гц) и акустическим профилографом (ЛЧМ сигнал 2-12 кГц).

Также, в ходе экспедиций проводился отбор донных осадков ударными трубками длиной 3 м с описанием керна и отбором проб для изучения молекулярного состава порового газа.

Результаты наблюдений. В результате высокодетальной батиметрической съёмки было обнаружено более 50 структур типа «hill-hole pairs» различной морфологии, расположенных двумя обширными полями. Первая группа структур прослеживается на подводном плато к юго-востоку от архипелага Земля Франца-Иосифа. Глубина до дна здесь составляет 170-200 м. Высота положительных форм рельефа варьирует от 40 до 130 м, глубина депрессий – от 20 до 50 м. В плане положительные структуры преимущественно представлены изометричной округлой или подковообразной формой. Понижения рельефа линейно вытянуты с северо-запада на юго-восток и ограничены с юго-востока возвышенностями.

Вторая, более многочисленная, группа структур была обнаружена на восточной части поднятия Персея на глубине 215-240 м. В этом районе структуры характеризуются меньшими размерами: высота возвышенностей не превышает 30 м, а глубина отрицательных форм рельефа варьирует от первых метров до 15 м. Форма в плане более разнообразна, чем у структур первой группы. Гляциотектонические пары на различных участках поднятия Персея изменяют свою ориентацию: от юг–север на северной окраине поднятия до северо-запад–юго-восток в его восточной части.

Результаты сейсмоакустических исследований показывают наличие маломощного (менее 1 м) слоя мягких осадков, определённых в ходе донного пробоотбора как голоценовые илы морского происхождения, перекрывающих более плотные отложения ледникового и ледниково-морского генезиса.

Геохимическое исследование порового газа показало низкие концентрации метана во всех отобранных донных отложениях (не более 20 ppm).

Обсуждение результатов. Обнаружение крупных гляциотектонических структур на обширной территории позволяет существенно уточнить существующие модели развития ледяного покрова. Новые данные вносят вклад как в вопросах определения направления и скоростей движения ледовых потоков, так и конфигурации ледникового щита.

Малая мощность морских отложений, перекрывающих ледниковые структуры, указывает на то, что гляциотектонизм происходил во время последнего оледенения. Распространение структур типа «hill-hole pair» на относительно мелководных участках, а не в глубоководных желобах, а также отсутствие линейных форм рельефа (мегамасштабной ледниковой линейности, друмлинов и др.), являющихся диагностическими признаками быстротекущих ледовых потоков, предполагает развитие в данных районах медленных потоков. Это подтверждается и результатами моделирования скоростей движения поверхности ледяного покрова в северо-восточной части Баренцева моря на протяжении большей части последнего оледенения [Patton et al., 2017].

Взаимное расположение возвышенности и депрессии для каждой гляциотектонической пары позволяет определить направление течения сформировавшего её ледникового потока. Результаты картирования структур, обнаруженных в рейсах ТТР, позволяют предполагать, что структуры на поднятия Персея сформировались радиально расходящимися от его центра ледниковыми потоками, что свидетельствует о наличии в этом районе остаточного ледникового купола [Соловьева и др., 2021]. Структуры, расположенные к юго-востоку от Земли Франца-Иосифа указывают на юго-восточное направление течения ледового потока [Dowdeswell et al., 2021].

Важно отметить широкое разнообразие морфологических характеристик гляциотектонических пар, которые также позволяют выдвинуть предположения об особенностях движения ледниковых потоков. Структуры первой группы представляют собой линейно-вытянутые глубокие ложбины, заканчивающиеся изометричными холмами той же ширины и объёма (Рис. 1А, Б). Вероятно, они формировались в результате однократного выталкивания кромкой льда осадка и коренных пород наподобие плуга и не перекрывались льдом. Напротив, структуры второго типа часто характеризуются подковообразной или неправильной формой с наличием у возвышенности «хвоста», вытянутого в противоположную от депрессии сторону (Рис. 1В, Г). Такие структуры указывают на двухфазное образование с начальным прогляциальным надвигом, за которым следует подледниковая деформация после их первоначального формирования в результате перекрытия ледниковым потоком.

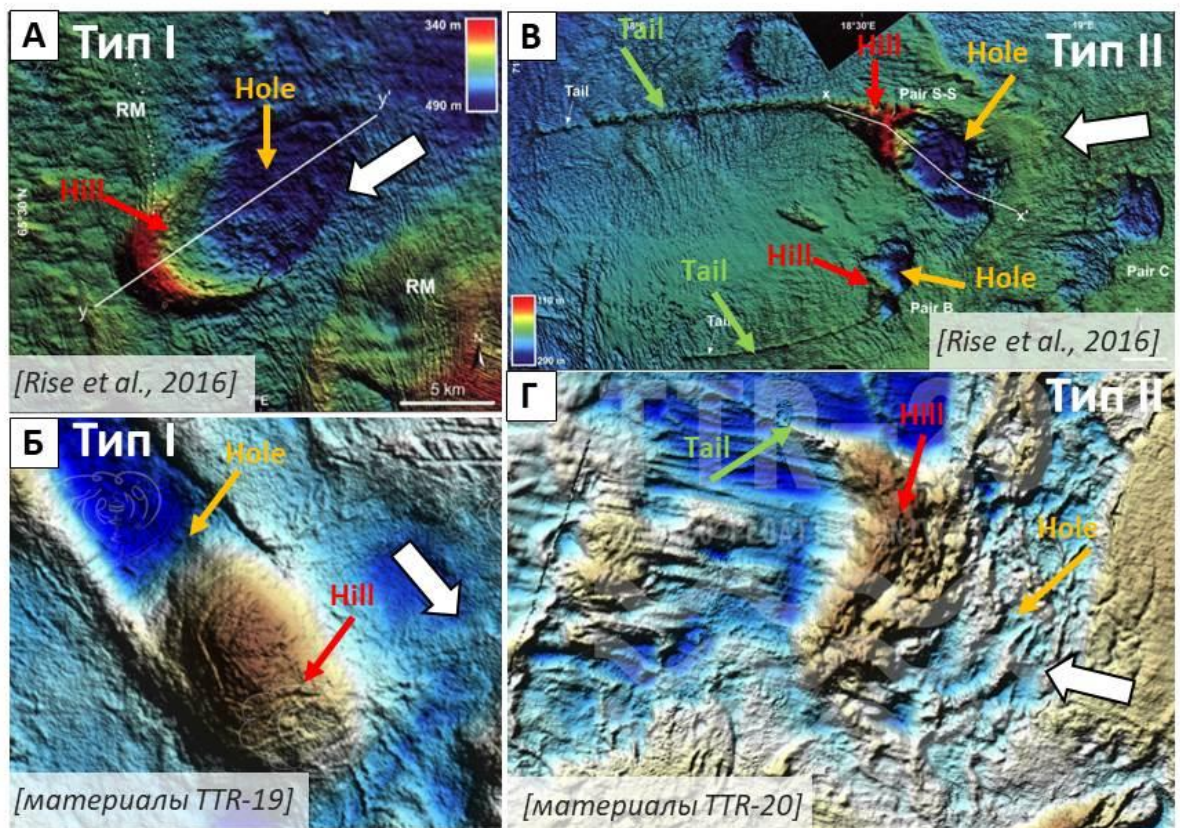


Рис. 1. Примеры гляциотектонических структур по литературным данным (А, В) [Rise et al., 2016] и материалам рейсов ТТР (Б, Г). Белые стрелки указывают направление течения ледниковых потоков, сформировавших гляциотектонические пары (красная стрелка указывает на возвышенность, желтая – на понижение в рельефе дна; зелёными стрелками обозначены «хвосты» – вытянутые валы, продолжающие основную возвышенность).

Механизм образования гляциотектонических пар. Важным и дискуссионным вопросом является определение механизма формирования структур типа «hill-hole pair». Обычно гляциотектонические пары располагаются на неглубоких участках дна вблизи

побережий, где, вероятно, лёд был относительно тонкий и медленно текучий. Иногда он примерзал к дну, увлекая за собой отложения с образованием сопряженной пары депрессии и возвышенности [Moran et al. 1980; Ottesen et al. 2005].

Согласно существующим представлениям, для протекания подобного процесса требуется наличие так называемого «липкого пятна» – участка отложений с повышенной прочностью и/или силой трения, вызванной предположительно частичной консолидацией осадка вследствие снижения давления поровой воды. Причиной этому может служить промерзание грунта или осушение осадка вследствие формирования газовых гидратов.

В районе распространения структур первой группы (к юго-востоку от архипелага Земли Франца-Иосифа) были обнаружены многочисленные крупные кратерообразные структуры, аналоги которых ранее наблюдались в 800 км к юго-западу от нашего района исследования, а их формирование определялось резким выбросом газа в результате диссоциации газовых гидратов после отступления ледника [Andreassen et al., 2017]. Несмотря на то, что современной флюидоразгрузки в данном районе не выявлено, на геофизических данных выделены разрывные нарушения, достигающие поверхности дна, и приуроченные к ним амплитудные аномалии в глубоких интервалах разреза, вызванные повышенной газонасыщенностью отложений. Таким образом, мы можем предполагать, что иницирующим механизмом для гляциотектонизма послужило формирование газовых гидратов под подошвой ледника.

Во втором районе (на поднятии Персея) не было обнаружено подобных кратерообразных структур. Также, в этом районе гляциотектоические пары распространены более широко, расположены ближе друг к другу и накладываются друг на друга, что позволяет сделать предположение о площадном распространении «липких пятен», в противопоставление первому району, где они носили локальный характер и формировались, вероятно, вблизи тектонических разломов. По данным признакам мы можем предполагать, что на поднятии Персея действовал другой механизм – промерзание грунта.

Однако нельзя исключать из внимания и другие возможные механизмы образования подобных морфологических структур. Например, аналогичные объекты, исследуемые в работе [Livingstone and Clarck, 2016], расположены на окончании туннельных долин и могли быть как следствием их формирования, так и, наоборот, иницирующим механизмом. Таким образом, для изучения каждой структуры «hill-hole pair» необходим комплексный геолого-геофизический подход, позволяющий всесторонне изучить различные характеристики и рассмотреть все возможные механизмы образования.

Заключение. Анализ геолого-геофизических материалов, полученных в рейсах Плавучего Университета ЮНЕСКО-МГУ TTR-19 и TTR-20, позволил обнаружить и детально изучить два обширных поля гляциотектонических структур. Различия в их морфологии и характере распространения позволяют выдвинуть два сценария их образования, связанных с формированием подледниковых газовых гидратов или мерзлых грунтов.

Полученные выводы позволили уточнить конфигурацию баренцевоморского ледникового покрова в период дегляциала, установить наличие остаточных ледовых куполов на поднятии Персея и Земле Франца-Иосифа, а также определить направление и оценить скорость течения ледниковых потоков в северной части Баренцева моря. Новые данные должны привести к пересмотру и корректировке представлений об эволюции четвертичного оледенения в этой части Арктики.

ЛИТЕРАТУРА

- Кригер Н.И. Основные вопросы гляциотектоники // В кн.: Краевые образования материковых оледенений. М., Наука. 1972.
- Левков Э.А. Гляциотектоника // Мн., Наука и техника. 1980. 280 с.

Миронюк С.Г., Иванова А.А. Микро- и мезорельеф гляциального шельфа Баренцева и Карского морей в свете новых данных // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2018. № 76. С. 41-58

Соловьева М.А., Ахманов Г.Г., Монтели А.И. Новые свидетельства Валдайского оледенения в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа (материалы TTR-19 и TTR-20) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Выпуск 8. С. 222-227. doi:10.24412/2687-1092-2021-8-222-227

Aber J.S., Ber A. Glaciotectonism // Developments in Quaternary Science Series, 2007. Vol. 6. 246 pp.

Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkepuliambatta S., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Serov P., Deryabin A., Mattingsdal R., Mienert J., Bünz S. Massive blow-out craters formed by hydrate controlled methane expulsion from the arctic seafloor // Science. 2017. Vol. 356. Is. 6341. P. 948–953. doi: 10.1126/science.aal450

Bluemle J.P., Clayton L. Large-scale glacial thrusting and related processes in North Dakota // Boreas. 1984. Vol. 13. Is. 3. P. 279–299. doi: 10.1111/j.1502-3885.1984.tb01124.x

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. Is. 12. P. 1484-1488. doi:10.1130/G49252.1

Hogan K.A., Dowdeswell J.A., Noormets R. Assemblages of submarine landforms in the glacial troughs of the northern Barents Sea, east of Svalbard // in Dowdeswell, J. A., Canals, M., Jakobsson, M., Todd, B. J., Dowdeswell, E. K. & Hogan, K. A. (eds) 2016. Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient. Geological Society, London, Memoirs, 46, 333–336. doi: 10.1144/M46.170

Johnstrup F. Über die Lagerungsverhältnisse und die Hebungsphänomene in den Kreidefelsen auf Moen und Rugen // Z. Deutsch. geol. Ges. 1874. 26, N3.

Johnstrup F. De geognostiske Forhold i Jylland // Tidskr. Landdkonomie. 1875. 4, N 9.

Klages J.P., Kuhn G., Hillenbrand C.-D., Graham A.G.C., Smith J.A., Larter R.D., Gohl K. First geomorphological record and glacial history of an inter-ice stream ridge on the West Antarctic continental shelf // Quaternary Science Reviews. 2013. Vol. 61. P. 47–61. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.11.007

Larter R.D., Hogan K.A., Hillenbrand C., Smith J.A., Batchelor C.L., Cartigny M., Tate A.J., Kirkham James D., Roseby Z.A., Kuhn G., Graham A.G.C., Dowdeswell J.A. Subglacial hydrological control on flow of an Antarctic Peninsula palaeo-ice stream // The Cryosphere. 2019. Vol. 13. P. 1583–1596. doi: 10.5194/tc-13-1583-2019

Livingstone S.J., Clark C.D. Morphological properties of tunnel valleys of the southern sector of the Laurentide Ice Sheet and implications for their formation // Earth Surface Dynamics. 2016. Vol. 4. P. 567-589. doi: 10.5194/esurf-4-567-2016

Moran S.R., Clayton L., Hooke R.L., Fenton M.M., Andriashek L.D. Glacier-bed landforms of the Prairie region of North America // Journal of Glaciology. 1980. Vol. 25. Is. 93. P. 457–476. doi: 10.3189/S0022143000015306

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. Is. 7-8. P. 1033-1050. doi: 10.1130/B25577.1

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

Rise L., Bellec V.K., Ottesen D., Bøe R., Thorsnes T. Hill-hole pairs on the Norwegian continental shelf // in Dowdeswell, J. A., Canals, M., Jakobsson, M., Todd, B. J., Dowdeswell, E. K. & Hogan, K. A. (eds) Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and

Ancient. Geological Society, London, Memoirs. 2016. Vol. 46. P. 203–204. doi: 10.1144/M46.42

Sættem, J. Glaciotectonic forms and structures on the norwegian continental shelf: observations, processes and implications // Norsk Geologisk Tidsskrift, 1990. Vol. 70. No. 2. P. 81–94.

Slater G. Glacial tectonics as reflected in disturbed drift deposits // Proc. Geologists' Assoc. 1926. N 37.

Winsborrow M., Andreassen K., Hubbard A., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Patton H. Regulation of ice stream flow through subglacial formation of gas hydrates // Nature Geoscience. 2016. Vol. 9, no. 5, p. 370–374. doi:10.1038/ngeo2696

GLACIOTECTONIC FEATURES IN THE NORTH-EAST BARENTS SEA

¹*Solovyeva M.A., Akhmanov G.G., Montelli A.I.*

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Scott Polar Research Institute, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom

Two fields of glaciotectonic structures ("hill-hole pairs") were discovered in the Barents Sea and studied in detail by a set of geological and geophysical methods during the TTR-19 and TTR-20 cruises, for the first time for Russian shelves. Their detection is an irrefutable evidence of the development of ice-sheet glaciation in this area. Analysis of their features allows us to make important conclusions about the configuration and dynamics of ice-flows. The presence of ice domes on the Perseus rise and Franz Josef Land has been established and the direction of the ice-flows has been determined in the northern part of the Barents Sea Shelf. Differences in the morphology and distribution of the discovered glaciotectonic structures indicate different mechanisms of their formation, presumably associated with the formation of subglacial gas hydrates and permafrost zones.

Keywords: *Barents Sea, multi-beam echosounding, seismic and acoustic profiling, hill-hole pairs, Weichselian glaciation*