doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-176-180



## МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОЙ ПЛОТИНЫ ГУДЗОНОВА ЗАЛИВА: РЕАКЦИЯ НА ПОХОЛОДАНИЕ КЛИМАТА В ПОЗДНЕМ ДРИАСЕ (ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)

 $\boxtimes$  Кашдан А.И. $^1$ , Шейнкман В.С. $^2$ 

<sup>1</sup> Политехнический институт Монреаля, Монреаль, Квебек, Канада <sup>2</sup> Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия *research@circucity.com* 

Похолодание климата в позднем дриасе в Европе началось внезапно, примерно в 12 679 лет до н. э. В основе нашей палеогляциологической модели положено изучение морских осадочных кернов из желоба Зюйдкапский (Сторфьорден), Западный Шпицберген, и на юге Гренландии. Резкому наступлению холодного этапа сопутствовало быстрое разрушение ледяной плотины, возникшей ранее при перегораживании ледниковым потоком восточной части Гудзонова залива. Это событие было связано с последним крупным накоплением ледникового льда на части лаврентийского ледяного купола в районе Гудзонова залива.

Ключевые слова: *паврентийский ледяной купол, изменения климата, разрушение ледяной плотины, ранний дриас* 

Постановка задачи. В работе освещена проблема быстрого разрушением ледяной плотины, возникшей в прошлом при перегораживании одним из ледниковых потоков лаврентийского ледяного купола восточной части Гудзонова залива [Johnson, 2021]. Разрушение произошло под воздействием теплового переключателя с изменением энтальпии [Sevestre, Benn, 2015; Benn et al., 2019] и связано с условиями на ложе ледника. Увеличение аккумуляции снега на ледниковом куполе в районе Гудзонова залива создало дополнительные градиенты давления, которые обеспечили более интенсивное течение ледяного потока в восточном направлении. Перед этим в западной части залива образовалось сильно засоленное подледниковое озеро. Поток льда увлек соленую воду озера в сеть каналов на морском дне между озером и ледяной плотиной, и в результате дополнительной гидродинамической нагрузки сеть каналов стала разрушаться. Это привело к деструкции ледяной плотины: большая ее часть отсоединилась от мерзлого основания, что привело к ускоренному разрушению ледяного тела. Данное событие отражается в морских осадках, фиксирующих резкое похолодание в данном районе в то время. Поскольку северная часть полуострова Лабрадор и южная часть Баффиновой Земли находятся под большим влиянием Атлантики, в отличие от холодного Канадского Арктического архипелага, палеоклиматические события, которые интерпретируются в морских геологических колонках на Западном Шпицбергене и на юге Гренландии, можно условно перенести на территорию Гудзонова залива, что и было использовано в настоящей работе. В итоге создана предварительная палеогляциологическая модель отмеченных событий на основе архивных данных и полевых исследований летом 2024 г. на юге острова Баффинова Земля.

Материалы и методы исследования. В работе сделана попытка провести реконструкцию быстрого разрушения ледяной плотины в восточной части Гудзонова залива, включая опыт предыдущих исследований [MacAyeal, 1993], для объяснения резкого начала изменения климата на Западном Шпицбергене и на юге Гренландии в эпоху позднего дриаса. Анализ причин, вызвавших разрушение древнего ледника, проведен с использованием данных о геометрии гляциальных форм рельефа и батиметрии дна моря, взятых из архивов Геологической службы Канады и материалов предварительных исследований в июле-августе 2024 г. в каньоне Йорка на Баффиновой Земле (рис. 1b).

Изучение этих данных привело к выводу о вероятном снижении температуры воздуха и увеличении количества снегопадов на северо-востоке Канады около 12 679 лет до н.э., что позволило выдвинуть гипотезу о формировании высокосоленого субгляциального озера в западной части Гудзонова залива. Тогда как анализ воздействия этого озера приводит к мысли о физически реалистичной модели резкого разрушения ледяной плотины. Контекст этой модели соответствует квазициркулярной природе событий Хайнриха (среднечастотные цикличности 5 000-10 000 лет), которые приводили к остановке Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС) и повторным дегляциациям значительной части лаврентийского ледникового щита.

На основе предварительных результатов полевых исследований были смоделированы скорости движения, толщина и конечное положение древнего ледника, предполагая равномерное распределение поверхностного баланса массы (включающего годовое снежное питание и поверхностное таяние). Точное определение конечного положения ледника выполнено с использованием уточненной подвижной сетки, а устойчивые состояния вычислены путем численного решения для различных режимов ледового потока. Кроме того, воспроизведены ключевые результаты для устойчивых и неустойчивых состояний ледника по теоретической схеме безразмерности, разработанной Сянь-Ванг Оу [Ои, 2021] — используя высокоточное моделирование с помощью численной ледниковой модели.

Результаты и их обсуждение. Квазипериодические события, при которых тающие айсберги распространяли ледниковые обломки по северной части Атлантики на высоких широтах, были описаны в работе [Heinrich, 1988]. В концептуальной модели Джонсона-Лауритцена [Johnson, 2021] событие начинается с внезапного разрушения ледяной дамбы, пересекающей поток, из-за увеличивающегося давления льда, движущегося на восток в Гудзоновом заливе. Событие продолжалось более тысячи лет, сопровождаясь выводом в восточном направлении огромного количества льда и талой воды из центрального канадского ледникового купола над заливом Гудзон, а также — боковых куполов Фокс и Лабрадор-Квебек, через залив в северную часть Атлантики. Ледниковые обломки, перенесенные тающими айсбергами, обнаруживаются почти на таком же удалении на восток, как до побережья Ирландии.

Были изучены морские осадочные керны из желоба Зюйдкапский (Сторфьорден) на Западном Шпицбергене, по которым выявлен холодный период 12.6 - 12.7 тыс. лет до н.э. и продвижение ледника до 30 км на линии налегания морских ледниковых потоков при образование ледникового шельфа. Также проанализированы морские геологические колонки по южной части Гренландии из архивов и последних публикаций Датской геологической службы (GEUS).

Гренландский ледниковый щит отступил от своего позднеледникового максимума в МИС2 к внутреннему шельфу около 15 тыс. лет назад в Юго-Восточной Гренландии и достиг своего современного положения между 12 и 10 тыс. лет назад. Исследования, проведенные в Восточной Гренландии, показывают, что максимальные температуры воздуха во время голоценового термического максимума наблюдались там около 10 тыс. лет назад, когда температура превышала показатели XX века. Напротив, в южной и югозападной Гренландии пик голоценового термического максимума пришелся на середину голоцена [Andresen at al., 2022]. Эта задержка была вызвана поступлением в Северную Атлантику больших объемов холодной талой воды из разрушающихся ледниковых покровов Северного полушария, что привело к значительному охлаждению поверхностных и подповерхностных вод в раннем голоцене в районе Лабрадора.

Ранее [Stravers et al., 1992] было отмечено о свидетельствах течении северных ветвей ледового потока через залив Унгава, вдоль устья Гудзонова пролива до полуострова Холл. Северный лабрадор-квебекский поток, на который указывают царапины на коренных породах и ледниковые валуны из известняка, перенесенные ледником на дно Гудзонова залива – датированные временем 10 900 лет до н.э., через 500

лет после окончания позднего дриаса, в период, когда количество твердых осадков было уже намного меньше.

Экспедиционные исследования летом 2024 г. позволили получить реконструкцию толщины ледяной плотины и подтвердили гипотезу ограниченного продвижения льда до отметок приблизительно 100 м на восточной оконечности полуострова Мета Инкогнита на юге Баффиновой Земли (рис. 1а). Поверхность поперечного потока на центральной линии залива должна была быть лишь немного выше современного уровня моря (см. рис. 1а). В исследуемой области, между полуостровом Лабрадор и островом Резолюшн, толщина льда была 300-500 м — при максимальном снегонакопление и нынешней глубине моря с ее максимумом 400 м.

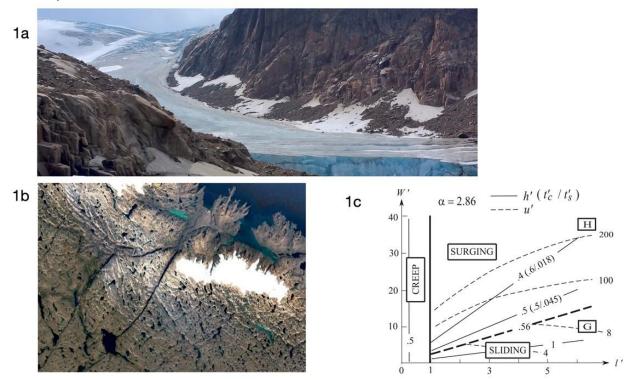


Рис. 1. Ледник Гриннелл, к юго-востоку от залива Чарльза Фрэнсиса Холла с бортами ледниковой обработки до 100 м, фото Грега Смита.

1b. Каналы, которые были выветрены в твердых кристаллических породах по линиям тектонических разломов, и несли талые воды из ледяной плотины Гудзонова пролива с современного уровня моря вверх на север полуострова Мета Инкогнита и впадали в залив Фробишера.1с. Двумерная диаграмма режимов ледников построенная с помощью теоретической схемы безразмерности, разработанной Сянь-Ванг Оу [Ои, 2021], где h - толщина ледника, h · - безразмерная величина, w - половина ширины ледника, w · безразмерная величина, l - полудлина ледника, l · - безразмерная величина длины ледника, u - скорость движения льда, u · - безразмерная величина скорости движения льда, □ - тепловой параметр, tспродолжительность ползучести, ts - продолжительность скольжения; бокс H - ледниковый палеопоток Гудзонова пролива, G - северо-восточный гренландский ледниковый поток.

В данной работе рассмотрена только динамика и неустойчивость ледников, ограниченных топографической впадиной в Гудзоновом заливе. Такой тип сёрджей, фиксированный шириной ледового потока, сдерживает боковой отвод талых вод из-под ледника. В этом случае эта решение проблемы попадает в сферу действия модели недренированного пластического слоя [Tulaczyk, 2000], которая не содержит ни одного свободного параметра и, поэтому, может быть проверена на достоверность по результатам современных наблюдений на пульсирующих ледниках, например на леднике Монакобрин на северном Шпицбергене [Oerlemans, 2018] и северо-восточных гренландских ледниковых потоках с неустойчивыми динамическими режимами (рис. 1с). Используя схему безразмерности Сянь-Ванг Оу [Ou, 2021] (рис. 1с), построена двумерная диаграмма, отображающая ледниковые режимы устойчивой ползучести, подвижки (или циклической

пульсации) и устойчивого скольжения. На этой основе можно прогнозировать динамические свойства ледников в диапазоне внешних условий — таких, как климатический форсинг, влияние пиков ложа ледника и наличия соленого озера на дне ледника.

**Выводы.** В проведенных исследованиях, связанных с палеогляциологичесими реконструкциями на основе математического моделирования, выделен механизм таяния каналов в восточной части Гудзонова залива в позднем дриасе. Детализированный эндотермический механизм таяния каналов в ледовом потоке на морском дне основан на известных физических эффектах. Аналогичный механизм таяния используется для очистки обледенелых дорог в северных зимних условиях. Если температура не опускается ниже примерно –5°C, соль, нанесенная на дорожное покрытие, вступает в реакцию со льдом при температуре окружающей среды.

Тепло из окружающей среды на дне моря и соли вызывает таяние льда. В результате соленая вода, образующаяся в процессе реакции, становится холоднее окружающей морской среды и стекает в дренажные системы. В холодном палеоклимате Гудзонова залива температура льда и соленой воды уже была слишком низкой, чтобы вызвать значительное таяние. Но затем в период события Хайнрих при изменении температуры воздуха обеспечили процесс таяния на ложе ледника, связанного с динамикой ледника, увеличением снегопадов и подледниковым трением вблизи трещин разрушения каналов ледяной платины.

Работа выполнена при поддержке ресурсов по проекту FWRZ-2021-0005.

## ЛИТЕРАТУРА

Andresen C.S., Sha L., Seidenkrantz M.S., Dyke L.M., Jiang H. Early Holocene palaeoceanographic and glaciological changes in southeast Greenland // The Holocene. 2022. Vol. 32. Is. 6. P. 501-514. doi:10.1177/095968362210807

Benn D.I., Fowler A.C., Hewitt I., Sevestre H. A general theory of glacier surges // Journal of Glaciology. 2019. Vol. 65. Is. 253. P. 701-716. doi:10.1017/jog.2019.62

*Heinrich H*. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years // Quaternary Research. 1988. Vol. 29. Is. 2. P. 142-152. doi:10.1016/0033-5894(88)90057-9

*Johnson R.G.* Hudson Strait ice dam collapse: An explanation for the onset of the Younger Dryas cold climate in Europe in only one year // Journal of Advances in Natural Science. 2021. Vol. 8, 1–11. doi:10.24297/jns.v18i.8961

*MacAyeal D.* Binge/purge oscillations of the Laurentide ice sheet as a cause of North Atlantic's Heinrich events // Paleoceanography. 1993. Vol. 8. Is. 6. P. 775-784. doi:10.1029/93PA02200

*Oerlemans J.* Modelling the late Holocene and future evolution of Monacobreen, northern Spitsbergen // The Cryosphere. 2018. Vol. 12. Is. 9. P. 3001-3015. doi:10.5194/tc-12-3001-2018

*Ou H.W.* A theory of glacier dynamics and instabilities Part 1: Topographically confined glaciers // Journal of Glaciology. 2022. Vol. 68. Is. 267. P. 1-12. doi:10.1017/jog.2021.20

Sevestre H., Benn D.I. Climatic and geometric controls on the global distribution of surgetype glaciers: implications for a unifying model of surging // Journal of Glaciology. 2015. Vol. 61. Is. 228. P. 646-662. doi:10.3189/2015JoG14J136

Stravers J.A., Miller G.H., Kaufman D.S. Late glacial ice margins and deglacial chronology for southeastern Baffin Island and Hudson Strait, eastern Canadian Arctic // Canadian Journal of Earth Science. 1992. Vol. 29. Is. 5. P. 1000-1917. doi:10.1139/e92-083

*Tulaczyk S., Kamb W.B., Engelhardt H.F.* Basal mechanics of Ice Stream B, west Antarctica: 2. Undrained plastic bed model // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2000. Vol. 105. Is. B1. P. 483-494. doi:10.1029/1999JB900328

## HUDSON STRAIT ICE DAM COLLAPSE: PRELIMINARY RESULTS FROM A STUDY OF THE ONSET OF THE YOUNGER DRYAS COLD CLIMATE

Kashdan A.Y.<sup>1</sup>, Sheinkman V.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Polytechnique Montréal, Montreal, Canada <sup>2</sup> Earth Cryosphere Institute FRS Tyumen Science Center, SB RAS, Russia

The Younger Dryas cold climatic event in Europe began suddenly, around 12,679 B.P. We studied marine sediment cores from Storfjorden and Storfjorden Trough (Svalbard) and southeast Greenland to reconstruct the paleoglaciology condition of the paleoclimatic event. The abrupt onset of the cold period was caused by the rapid collapse of an ice dam due to glacier flow across eastern Hudson Bay. This event was caused by the last major accumulation of glacial ice within the ice dome of Hudson Bay.

Keywords: Laurentide ice dome, Sudden climate change, Ice dam collapse, Younger Dryas

## **REFERENCES:**

Andresen C.S., Sha L., Seidenkrantz M.S., Dyke L.M., Jiang H. Early Holocene palaeoceanographic and glaciological changes in southeast Greenland // The Holocene. 2022. Vol. 32. Is. 6. P. 501-514. doi:10.1177/095968362210807

Benn D.I., Fowler A.C., Hewitt I., Sevestre H. A general theory of glacier surges // Journal of Glaciology. 2019. Vol. 65. Is. 253. P. 701-716. doi:10.1017/jog.2019.62

*Heinrich H.* Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years // Quaternary Research. 1988. Vol. 29. Is. 2. P. 142-152. doi:10.1016/0033-5894(88)90057-9

*Johnson R.G.* Hudson Strait ice dam collapse: An explanation for the onset of the Younger Dryas cold climate in Europe in only one year // Journal of Advances in Natural Science. 2021. Vol. 8, 1–11. doi:10.24297/jns.v18i.8961

*MacAyeal D.* Binge/purge oscillations of the Laurentide ice sheet as a cause of North Atlantic's Heinrich events // Paleoceanography. 1993. Vol. 8. Is. 6. P. 775-784. doi:10.1029/93PA02200

*Oerlemans J.* Modelling the late Holocene and future evolution of Monacobreen, northern Spitsbergen // The Cryosphere. 2018. Vol. 12. Is. 9. P. 3001-3015. doi:10.5194/tc-12-3001-2018

*Ou H.W.* A theory of glacier dynamics and instabilities Part 1: Topographically confined glaciers // Journal of Glaciology. 2022. Vol. 68. Is. 267. P. 1-12. doi:10.1017/jog.2021.20

*Sevestre H.*, *Benn D.I.* Climatic and geometric controls on the global distribution of surge-type glaciers: implications for a unifying model of surging // Journal of Glaciology. 2015. Vol. 61. Is. 228. P. 646-662. doi:10.3189/2015JoG14J136

Stravers J.A., Miller G.H., Kaufman D.S. Late glacial ice margins and deglacial chronology for southeastern Baffin Island and Hudson Strait, eastern Canadian Arctic // Canadian Journal of Earth Science, 1992. Vol. 29. Is. 5. P. 1000-1917. doi:10.1139/e92-083

Tulaczyk S., Kamb W.B., Engelhardt H.F. Basal mechanics of Ice Stream B, west Antarctica: 2. Undrained plastic bed model // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2000. Vol. 105. Is. B1. P. 483-494. doi:10.1029/1999JB900328