

ПРИРОДА

9 2020

СКВОЗЬ ЛЕДЯНОЙ ПОТОК: КАК ДОБРАТЬСЯ ДО ЛОЖА ЛЕДНИКА?

С. 18

В Гренландии продолжается глубокое бурение льда в рамках нового международного проекта EastGRIP. Понимание динамики поведения ледяных потоков позволит прогнозировать последствия глобального потепления.



Главный редактор
академик, доктор биологических наук **А.В.Лопатин**

Заместитель главного редактора
доктор физико-математических наук **А.В.Бялко**

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.Батурин**, доктор биологических наук **Д.И.Берман**, доктор биологических наук **П.М.Бородин**, **М.Б.Бурзин**, доктор физико-математических наук **А.Н.Васильев**, член-корреспондент, доктор филологических наук **В.И.Васильев**, кандидат биологических наук **М.Н.Воронцова**, доктор физико-математических наук **Д.З.Вибе**, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук **М.С.Гельфанд**, академик, доктор физико-математических наук **С.С.Герштейн**, профессор **А.Глухов (A.Glukhov, США)**, академик, доктор физико-математических наук **Г.С.Голицын**, доктор химических наук **И.С.Дмитриев**, кандидат биологических наук **С.В.Дробышевский**, академик, доктор физико-математических наук **Л.М.Зеленый**, академик, доктор биологических наук **Н.А.Зиновьева**, академик, доктор биологических наук **А.Л.Иванов**, профессор **Т.Йованович (T.Jovanović, Сербия)**, доктор биологических наук **С.Л.Киселев**, кандидат географических наук **Т.С.Клювиткина**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **М.В.Ковальчук**, член-корреспондент, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, иностранный член РАН, профессор **Е.Кунин (E.Koonin, США)**, доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Леин**, академик, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов (Sh.Mitalipov, США)**, доктор геолого-минералогических наук **Т.К.Пинегина**, член-корреспондент, доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, кандидат географических наук **Ф.А.Романенко**, академик, доктор физико-математических наук **А.Ю.Румянцев**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Н.И.Санжарова**, доктор физико-математических наук **Д.Д.Соколов**, кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина**, кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина**, **Н.В.Ульянова**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепашук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Гренландия. Бурение ее ледников позволит изучить динамику движения льда и получить уникальную климатическую летопись. См. в номере: **П.Г.Талалай**, **Д.Даль-Йенсен**, **С.Б.Хансен**, **Т.Дж.Попп**, **Дж.П.Стеффенсен**, **К.-Э.Нильсен**, **Н.Жан**. Сквозь ледяной поток Гренландии.

Фото П.Г.Талалай

В НОМЕРЕ:

3 А.К.Таскина, А.А.Муравьёва, А.С.Ельсуква,
В.С.Фишман

Методы машинного обучения в биологии

Современная биология становится наукой «больших данных», полученных в экспериментах. Для их анализа используются методы машинного обучения, которые позволяют не только проверять гипотезы, но и формулировать их.

18 П.Г.Талалай, Д.Даль-Йенсен, С.Б.Хансен,
Т.Дж.Попп, Дж.П.Стеффенсен,
К.-Э.Нильсен, Н.Жан

Сквозь ледяной поток Гренландии

В 2015 г. был основан проект глубокого бурения в верхней части крупнейшего Северо-Восточного гренландского ледяного потока. Цель проекта — изучение динамики льда и получение достоверной климатической хроники. К настоящему времени скважина пробурена до глубины 2122.4 м, а достичь ложа ледника планируется уже в следующие один-два полевых сезона.

32 ЗАМЕТКИ И НАБЛЮДЕНИЯ

А.В.Дьяков

Шаровые молнии, содержащие твердое или жидкое вещество

42 А.Ю.Овчарова

Гидронимы Волго-Донского междуречья

49 ИСТОРИЯ НАУКИ

Б.В.Булюбаш

«Силы» и энергия:

Майкл Фарадей против Джеймса Джоуля

59 ЛЕКТОРИЙ

Ю.С.Позднякова

Научные коммуникации:

как рассказать о своем исследовании обществу?

65 РЕДАКЦИОННАЯ ПОЧТА

Ю.И.Аршавский

Размышления об эгоизме

и альтруизме в эволюции человека

74 РЕЦЕНЗИИ

О.Г.Силкова, А.А.Торгашёва, П.М.Бородин

Загадочное очарование мейоза

(на книгу: Ю.Ф.Богданов, Т.М.Гришаева.

Консерватизм, изменчивость и эволюция мейоза)

77 НОВЫЕ КНИГИ

CONTENTS:

-
- 3** A.K.Taskina, A.A.Muravyova, A.S.Elsukova,
V.S.Fishman

Machine Learning in Biology

Modern biology is becoming the Big-data science. Machine learning methods are used for analyzing the experimentally obtained data. These methods allow not only testing hypotheses, but also formulating them.

- 18** P.G.Talalay, D.Dahl-Jensen, S.B.Hansen, T.J.Popp,
J.P.Steffensen, K.-E.Nielsen, N.Zhang

Through the Greenland Ice Stream

A deep drilling project at the upper part of the largest ice stream in Greenland, Northeast Greenland Ice Stream, was started in 2015, with the main objective of studying the ice dynamics and to assess the climatic chronicle. Recently, this borehole reached as deep as 2122.4 m, and drilling to the bedrock at the target depth of ~2550 m is planned for the next one or two field seasons.

32 NOTES AND OBSERVATIONS

A.V.Dyakov

Observation of Ball Lightning Containing Solid or Liquid Matter

- 42** A.Yu.Ovcharova

Hydronyms of the Volga—Don Interfluve

49 HISTORY OF SCIENCE

B.V.Bulyubash

“Forces” and Energy: Michael Faraday vs. James Joule

59 TALKS

Yu.S.Pozdnyakova

Scientific Communications: How to Tell the Public about Your Research?

65 EDITORIAL MAIL

Yu.I.Arshavsky

On the Biological Origin of Altruism

74 BOOK REVIEWS

O.G.Silkova, A.A.Torgasheva, P.M.Borodin

The mysterious charm of meiosis

(review of the book: Yu.F.Bogdanov, T.M.Grishaeva. Conservatism, Variability and Evolution of Meiosis)

77 NEW BOOKS

Сквозь ледяной поток Гренландии

П.Г.Талалай¹, Д.Даль-Йенсен², С.Б.Хансен², Т.Дж.Попп², Й.П.Стеффенсен², К.-Э.Нильсен², Н.Жан¹

¹Полярный научно-исследовательский центр, Институт полярных наук и техники, Цзилинский университет (Чанчунь, Китай)

²Центр физики ледникового климата и Земли, Институт Нильса Бора, Копенгагенский университет (Копенгаген, Дания)

В ледниках и ледниковых покровах находится две трети запасов пресной воды нашей планеты, и их деградация — главный источник повышения уровня Мирового океана. Основной сток Антарктического и Гренландского ледниковых покровов происходит через быстро движущиеся ледяные потоки и выводные ледники. Изучение особенностей их поведения, а также ответ на вопрос, почему огромная масса льда движется с высокой скоростью, важны для прогнозирования повышения уровня океана. В 2015 г. был основан проект глубокого бурения в верхней части крупнейшего Северо-Восточного гренландского ледяного потока. Основная цель проекта — изучение динамики льда путем исследования реологии ледяного керна, а также с помощью наблюдений за скольжением на ложе ледника и за деформацией скважины. К настоящему времени скважина достигла глубины 2122.4 м, несмотря на то что бурение часто шло не в штатном режиме. В 2020 г. оргкомитет проекта принял решение отменить полевой сезон из-за эпидемии коронавируса. Бурение до ложа ледника запланировано на следующие один-два года.

Ключевые слова: гренландский ледниковый покров, бурение льда, электромеханический буровой снаряд, ледяной керн.

Первым, кто дал научное определение ледяному потоку как части ледяного покрова, текущей быстрее, чем окружающий лед, и необязательно в том же направлении, был, по-видимому, Ч.Суизинбанк [1]. Это определение имеет два ключевых положения. Во-первых, ледяные потоки окружены льдом (если бы вокруг были горные хребты, то потоки рассматривались бы как выводные ледники), а во-вторых, они представляют собой внутреннюю часть ледяного щита и поэтому, в отличие от шельфовых ледников, не находятся в плавучем состоянии.

Скорость ледяных потоков может достигать 1000 м в год, что на один-два порядка выше скорости окружающего льда. Размеры потоков огромны — до 50–100 км в ширину, до 2–3 км по мощности и до сотни километров в длину. На сегодняшний день это крупномасштабное гляциологическое явление пока не имеет ни достоверного научного обоснования, ни достаточного

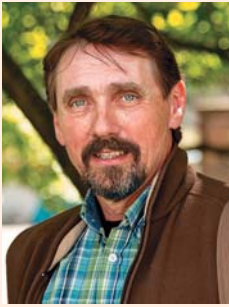


Павел Григорьевич Талалай, доктор технических наук, директор Института полярных наук и техники Цзилинского университета. Неоднократный участник полярных экспедиций в Антарктиду, Гренландию и Российскую Арктику. Область научных интересов — разработка технологии и техники глубокого бурения скважин во льду.
e-mail: ptalalay@yahoo.com



Дот Даль-Йенсен, профессор, руководитель Центра физики ледникового климата и Земли Копенгагенского университета, член Королевской датской Академии наук, Датской академии технических наук и Норвежской научной академии полярных исследований. Занимается реконструкциями климатических изменений по ледяным кернам, а также динамикой, историей и эволюцией Гренландского ледникового покрова.
e-mail: ddj@nbi.ku.dk

количества наблюдений. Вопросы, на которые ученые ищут ответы последние десятилетия, имеют не только сугубо научное значение, но и большое практическое, ведь понимание динамики по-



Стеффен Бо Хансен, технический и логистический координатор, участник более 50 экспедиций в полярных районах, специалист по разработке и испытаниям оборудования для бурения скважин во льдах и организации полевых работ.
e-mail: sbh@nbi.dk



Тревор Джеймс Попп, ассоциированный профессор, руководитель лаборатории стабильных изотопов, многократный участник экспедиций в Гренландии и Антарктиде. Научные интересы связаны с изотопной геохимией и техническими средствами исследования ледяных кернов.
e-mail: trevor@nbi.ku.dk



Йорген Педер Стеффенсен, профессор, куратор научных исследований ледяного керна, участник более 30 полярных экспедиций. Занимается стратиграфическим анализом и датированием кернов льда, а также изучением органических, минеральных и вулканических включений во льду.
e-mail: jps@nbi.ku.dk



Карл-Эмиль Нильсен, инженер, специалист по разработке и строительству бурового оборудования и экспериментальных установок.
e-mail: karl.emil.nielsen@nbi.ku.dk

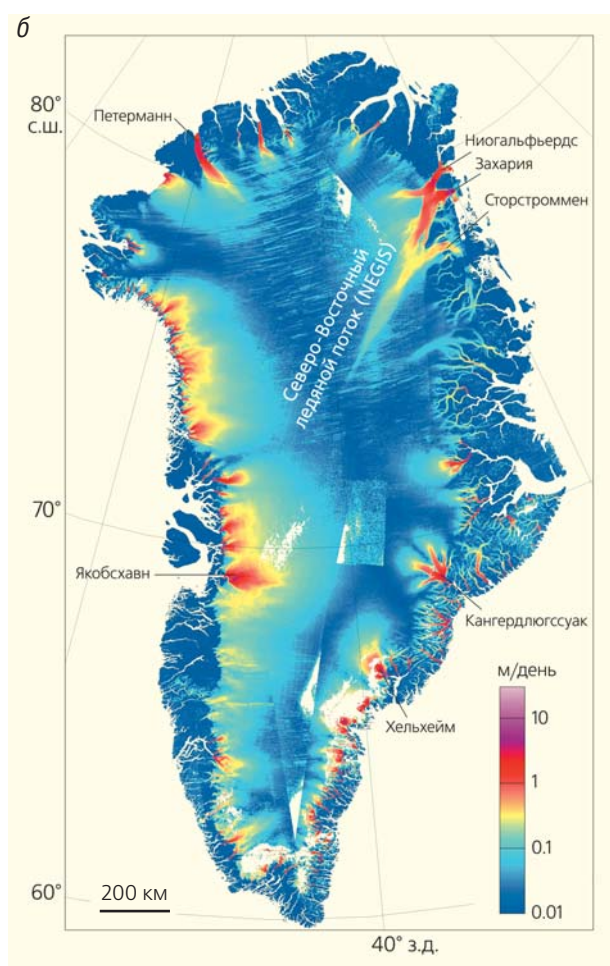
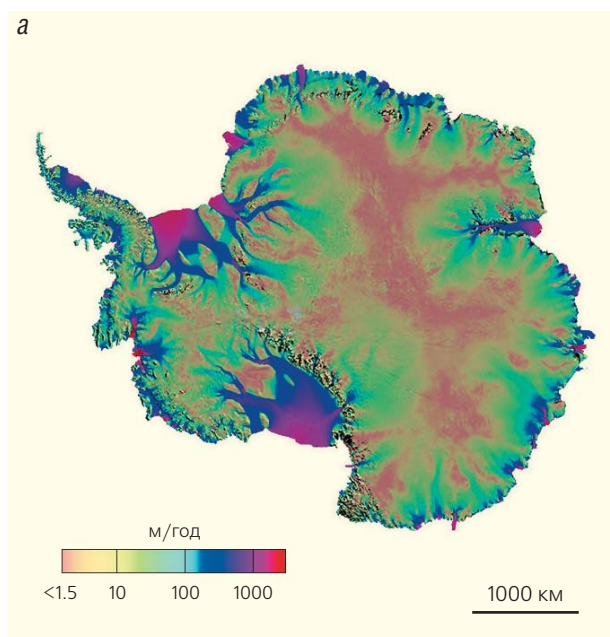


Нан Жан, ассоциированный профессор, заместитель директора Института полярных наук и техники Цилинского университета. Область научных интересов — разработка методов глубокого бурения скважин во льду.
e-mail: znan@jlu.edu.cn

ведения ледяных потоков позволит предугадать последствия глобального потепления. Почему огромная масса льда движется с такой большой скоростью? Какие факторы управляют скоростью и массой ледяного потока? С чего начинаются и почему прекращаются ускорения?

Исследования антарктических ледяных потоков начались несколько десятилетий назад [2, 3]. Полевые наблюдения и дистанционное зондирование позволили установить детальную конфигурацию и особенности поверхностного течения ледяных потоков Западной Антарктики: ледяного потока Уилланса (Whillans Ice Stream), ледяного потока Камба (Kamb Ice Stream), ледника Туэйтса (Thwaites Glacier) и других [4, 5]. Было высказано предположение, что до 90% стока Антарктического ледяного покрова происходит через быстро движущиеся ледяные потоки и выводные ледники [6]. Несколько ледяных потоков были исследованы при помощи скважин, проплавленных системами бурения горячей водой для того, чтобы получить доступ к ложу ледника и обеспечить скважино-геофизические наблюдения на границе ледника и подстилающих горных пород [7, 8]. Однако эти исследования единичны и не позволяют сделать однозначных выводов о механизме скольжения.

Гренландские ледяные потоки начали изучать значительно позже антарктических. В настоящее время установлено, что Гренландский ледяной покров интенсивно теряет свою массу и выводится в открытый океан через крупные ледяные потоки Хельгейм (Helheimgletscher), Якобсхавн (Jakobshavn Isbræ), Кангердлюгссуак (Kangerdlugssuaq Gletscher) и некоторые другие. Дистанционные исследования пока-



Скорости течения льда на поверхности Антарктического (а) и Гренландского (б) ледяных покровов, полученные с помощью спутниковой радиолокационной интерферометрии [9, 10].

зали, что недавнее увеличение скорости потери массы Гренландского ледяного покрова происходит в результате увеличения поверхностного таяния и сброса ледяных потоков, оканчивающихся морскими выводными ледниками, преимущественно вдоль юго-восточного и северо-западного побережий острова [11]. Недавние наблюдения выявили значительные ускорения движения практически всех гренландских ледяных потоков [12].

Самый большой из них — Северо-Восточный гренландский ледяной поток (Northeast Greenland Ice Stream — NEGIS). Он начинается у центрального ледораздела, прорезает ледяной щит примерно на 1000 км в форме клина и вытекает в океан через три больших выводных ледника: Ниогальфьердс (Niogahalfjærd's isstrømmen), Захария (Zachariae Isbræ) и Сторстроммен (Storstrømmen). Предполагается, что формирование ледяного потока на ледоразделе вызвано сильным таянием у его основания.

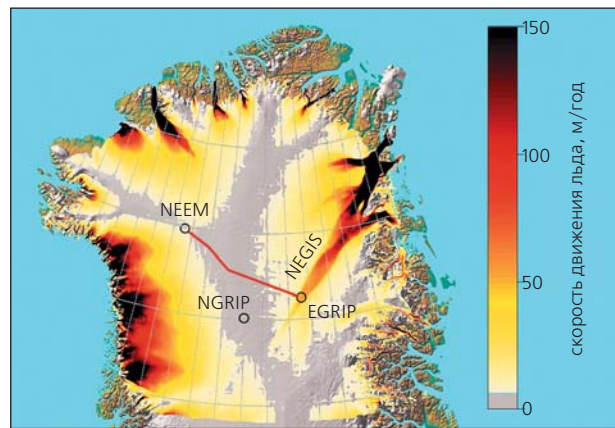
Поверхностные скорости течения NEGIS были получены со спутников высокого разрешения RADARSAT [12], а внутренняя структура ледяного потока изучалась путем авиационного и наземного радиозондирования [13]. Современные исследования NEGIS сосредоточены на глубоком бурении, позволяющем изучить динамику течения льда в ледяном потоке с помощью реологических и деформационных исследований керна, а также скважинных наблюдений. В предлагаемой читателю статье мы представляем историю создания проекта глубокого колонкового бурения через Северо-Восточный гренландский ледяной поток, рассказываем о современном положении дел, технических проблемах, связанных с бурением, путях их решения и дальнейших перспективах.

Выбор точки бурения

В 2012 г. был основан Международный консорциум для оказания финансовой и материально-технической поддержки проекту глубокого бурения льда в Восточной Гренландии (East Greenland Ice Drilling Project — EGRIP или EastGRIP). В настоящее время проект спонсируют национальные финансовые агентства Дании, вкладывающие примерно 50% от его общей стоимости, США, Германии, Японии, Норвегии, Швейцарии, Китая, Канады и Франции. Место заложения скважины было выбрано в верхней части ледяного потока в точке с координатами 75.63°с.ш. , 35.99°з.д. на высоте 2708 м над уровнем моря. Это примерно в 200 км от ледораздела и достаточно далеко от краевой части ледника, где наблюдается сильное поверхностное трещинообразование, опасное для проведения полевых операций.

Поверхностная скорость течения ледника в этом месте составляет 65 м/год, движется он в северо-восточном направлении. Таким образом, устье буровой скважины будет двигаться вместе со льдом примерно на 180 мм каждый день. Говоря другими словами, поскольку диаметр скважины (около 130 мм) меньше этого расстояния, скважина будет ежедневно полностью обновлять свое положение в пространстве. Толщина льда в выбранной точке составляет около 2550 м. Трассировка изохронных слоев от базы NGRIP (North Greenland Ice Project, Проект колонкового бурения Северной Гренландии) до EGRIP продемонстрировала существование ненарушенных ледяных пластов возрастом до 51 тыс. лет [15]. Это значит, что геохимическое исследование керна, кроме решения задач, связанных с динамикой льда, позволит получить климатические данные примерно половины последнего ледникового цикла.

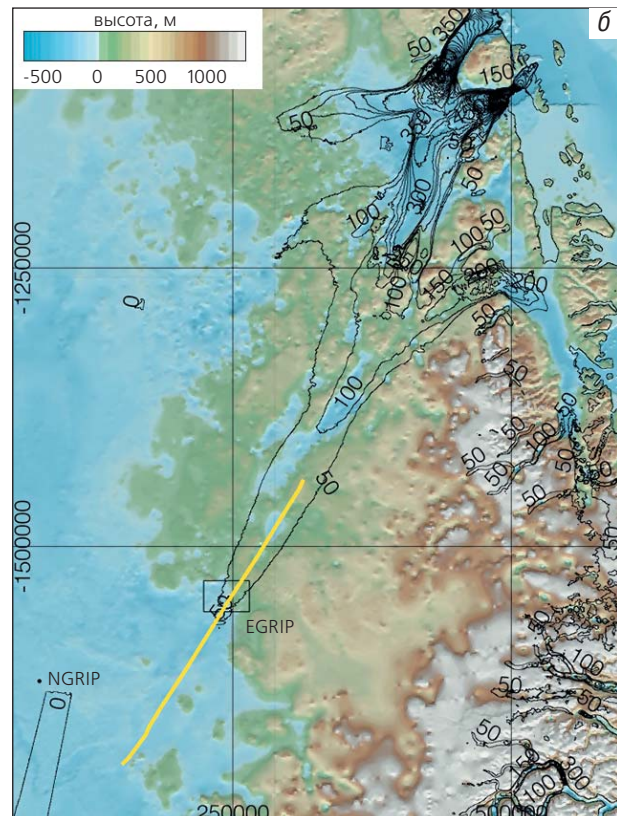
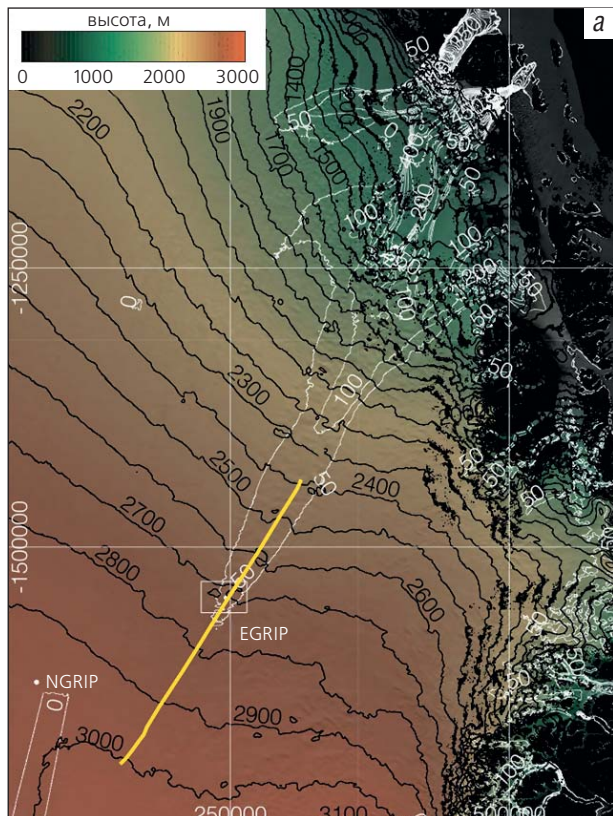
В пределах ледяного потока высота уменьшается в направлении от вершины ледяного покрова к побережью. В отличие от большинства других ледяных потоков, скорость течения NEGIS практически не зависит от топографии подледникового



Расположение полевой базы EGRIP и предыдущих точек колонкового бурения льда в северной части Гренландского ледяного покрова [14]. Маршрут похода от базы NEEM до EGRIP 18–26 мая 2015 г. обозначен красной линией.

ложа и участки с повышенной скоростью течения находятся над областями с небольшими подледниковыми возвышенностями.

В преддверии глубокого бурения, в 2012 г., в выбранной точке EGRIP была пробурена неглу-



Рельеф поверхности (а) и подледниковых горных пород (б) северо-восточной Гренландии [13]. Линии равных скоростей (год⁻¹) течения льда показаны с 50-метровыми интервалами белыми (а) и черными (б) контурами. Желтым показана линия профиля радиозондирования вдоль течения NEGIS.

бокая скважина глубиной 67 м. Установлено, что годовая толщина ледяных слоев составляет примерно 11 см, а геохимические исследования полученного керна показали, что участок сохраняет надежную, годично идентифицируемую информацию о химических примесях, включая натрий, аммоний и минеральную пыль [13]. Эти данные подтвердили возможность получения не только ожидаемых результатов динамики ледяного потока, но и достоверной голоценовой и позднеледниковой климатической хроники.

Поход через Северную Гренландию

Почти все буровые, жилые и вспомогательные сооружения были перевезены с предыдущей буровой площадки North Greenland EEMian (NEEM) в северо-западной части Гренландского ледяного щита, где с 2008 по 2012 г. пробурена скважина до глубины 2545 м [16]. После завершения этого проекта в 2012 г. большая часть тяжелой техники осталась на базе в двух гаражах. Припасы и оборудование были складированы внутри Купола (главного шарообразного здания), а также на санях, установленных на искусственных возвышениях из снега так, чтобы их не занесло во время ветреных и снежных зим. Необходимые запасы топлива были оставлены в трех цистернах.

Сорокапятитонный Купол решили перевезти целиком, не разбирая. Для этого под ним на цилин-

дрическом ободе установили четыре лыжи, сконструированные немецкой компанией Lehmann Maschinenbau. Их испытание провели в 2011 г. [17]. Обод сделали жестким, в центральной части установили ступицу, соединяющуюся с ободом стальными тросами (это напоминало лежащее велосипедное колесо). Вес самих саней составил 11,5 т. Под Куполом были вырыты три траншеи, в которых установили лыжи. Затем с помощью пневматических домкратов вес здания с ног перенесли на лыжи. Пробные испытания показали, что Купол без труда может транспортироваться снегоходом Pistenbully.

В 2015 г. был совершен экстраординарный переход от базы NEEM через центральную часть Гренландского ледяного щита к новой точке бурения EGRIP [18]. В общей сложности перевезено 143 т груза двумя снегоходами Pistenbully, тяжелым трактором Case, двумя вездеходами Flexmobile и тремя легкими снегоходами Lynx. Поход начался 18 мая, его участники преодолели 449 км и достигли выбранной точки бурения EGRIP 26 мая. В середине пути, после пересечения ледораздела, снежный покров неожиданно сделался очень мягким, и буксировать грузы стало чрезвычайно трудно. Утром 24 мая трактор Case не смог сдвинуть Купол, а снегоход Pistenbully не вытащил сани с оборудованием. Было решено тащить Купол двумя машинами, трактором и снегоходом. Оставив Купол, обе машины вернулись, чтобы забрать сани. В тот день

отряд преодолел всего 25 км, хотя до этого в среднем проходил около 50 км в сутки.

Предметом постоянной тревоги в пути было количество оставшегося горючего. При планировании похода расход топлива для всех транспортных средств оценивался в 25 л на 1 км. Однако в реальности это число оказалось в полтора раза больше — около 35 л/км. В результате на седьмой день пути топливо практически закончилось. Было решено оставить четыре единицы техники, несколько саней с буровым оборудованием и две пустые цистерны и идти к точке EGRIP прямо, а не обходным маршрутом, как предусматривалось планом полевых работ. Это сократило путь на 16 км. В предпоследний день пути, 25 мая, облегченный отряд преодолел ре-



Буксировка Купола. Август 2011 г., база NEEM.

Фото предоставлено компанией Lehmann Maschinenbau



Поход, прибывший в выбранную точку бурения проекта EGRIP. Май 2015 г.

Здесь и далее фото www.eastgrip.org

кордные 75 км. На следующий день он прибыл в точку EGRIP, имея в остатке всего 3 тыс. л топлива. Оставленные по пути машины и оборудование приехали через несколько недель, когда на базу доставили необходимое количество горючего.

Логистика и строительство базы EGRIP

Участники, продовольствие, топливо, буровая жидкость, научное оборудование доставляются на базу EGRIP из Кангерлуссуака, поселения на западном побережье Гренландии. Поселок расположен в верховьях длинного (180 км) фьорда с одноименным названием. Это главный узел воздушного сообщения Гренландии с Европейским континентом, отсюда регулярно летают самолеты до Копенгагена. Кангерлуссуак имеет давнюю логистическую историю геофизических и гляциологических проектов в Гренландии.

Транспортировка от Кангерлуссуака до базы EGRIP, а это приблизительно 1000 км, осуществляется самолетами LC-130 Hercules с колесно-лыжным снаряжением. Управляет этими перелетами 109-е воздушное под-



База EGRIP с высоты птичьего полета, снятая дроном с камерой. Июнь 2016 г.

разделение ВВС США, его основная миссия заключается в оказании воздушной поддержки американскому Национальному научному фонду в проведении арктических и антарктических операций. Имея максимальный радиус полета около 3800 км, самолет LC-130 может перевозить около 6 т груза и до 30 пассажиров. Для сравнения: эти показатели у Basler BT-67, который также весьма широко используется в полярных регионах, в два-три раза ниже. В течение летнего сезона, который обычно начинается в конце апреля и заканчивается в середине августа, 109-е подразделение выполняет 12–18 полетов в лагерь EGRIP, в зависимости от необходимости материально-технического обеспечения и состояния взлетно-посадочной полосы в лагере.

База EGRIP была построена в течение летнего сезона 2016 г. как полностью действующая полярная станция с площадкой для глубокого бурения, кернохранилищем, научной лабораторией по исследованию ледяного керна, мастерскими, гаражом и жильем для 24 (максимум 52) человек. Шарообразный главный Купол, доставленный с ликвидированной базы NEEM, разделен на два этажа: на первом расположены кухня, столовая, душевая, туалет, а на втором — зона отдыха, несколько компьютерных станций, кабинет начальника базы. Застекленный пост в верхней части второго этажа позволяет осматривать местность на многие километры вокруг базы. Это особенно важно не только для отслеживания взлета и посадки самолетов, но и для наблюдения за передвижениями белых медведей, которые несколько раз посещали станцию. Поблизости от Купола расположились несколько палаток, которые служат жильем для персонала.

Основное научное и буровое оборудование расположено под снегом в двух соединенных тунне-



Снегоход Pistenbully со снегоуборочной насадкой вырезает траншею.



Надувные баллоны, уложенные в траншею и готовые к засыпке.

лях — научной и буровой траншеях. Они выкопаны с помощью снегоуборочной насадки, установленной на переднюю часть вездехода Pistenbully. При использовании традиционной технологии траншеи были бы перекрыты деревянными или стальными балками и листами фанеры. Для упрощения конструкции и снижения веса необходимых



Строительство кровли траншей. Баллоны забрасываются снегом.



Выравнивание стен и пола внутри готовых траншей.

материалов в EGRIP применили инновационный «баллонный метод» сооружения кровли из уплотненного снега. Девять огромных резиновых баллонов были уложены в выкопанные углубления и надуты сжатым воздухом. Для строительства буровой и научной траншеи использовались два самых больших баллона — длиной 35 м и диаметром 5 м.

Общий вес всего оборудования, включая насосы и шланги, составил менее 2 т. Когда все баллоны полностью надули, отряд начал перегружать снег обратно, т.е. сверху на баллоны. Через три дня, когда снег достаточно осел, баллоны были спущены и убраны. Так появились вполне благоустроенные туннели. Строительство всех подземных сооружений заняло 19 дней, или 490 человеко-часов. Это оказалось значительно быстрее, чем в лагере NEEM в 2008 г., когда на строительство траншей ушло 32 дня, или 1040 человеко-часов.

В следующем году обнаружили, что все туннели и траншеи стали ниже примерно на 50 см. К сожалению, такие же деформации случались в 2018 и 2019 гг. Каждый раз для возобновления буровых работ после весенней расконсервации станции нужно выполнять достаточно трудоемкую работу по срезанию снега со стен и кровли.

Бурение глубокой скважины

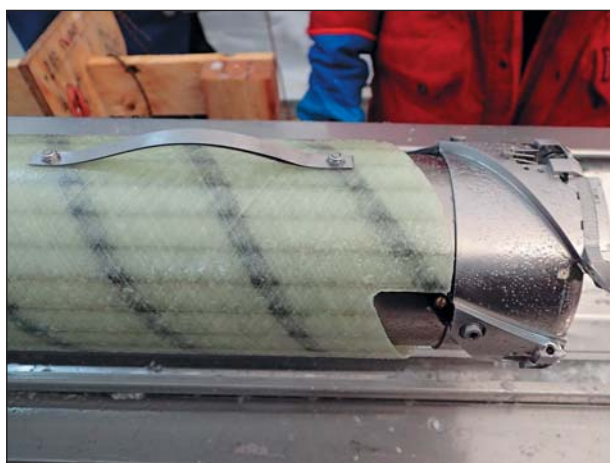
В сезоне 2016 г. в буровой траншее смонтировали антискользящий пол, поставили верстаки, установку неглубокого бурения и другое оборудование. Все буровые работы производились электромеханическим снарядами Hans Tausen, разработанном в Копенгагенском университете и названном так по имени ледяного купола Ханс Таузен на севере Гренландии, где он был впервые испытан в 1995 г. [19]. Этот снаряд может работать при бурении как «сухих» мелких, так и глубоких скважин, заполненных про-

мывочной жидкостью. Снаряд состоит из колонковой трубы, шламоборника, герметичного отсека с электрическим приводом и электроникой, распорного устройства и кабельного замка.

Для того чтобы установить специальную обсадную колонну, изолирующую проникаемую поверхностную снежно-фирновую толщу, пробури-



Основные компоненты электромеханического бурового снаряда Hans Tausen. Начиная с 1995 г. более 15 тыс. м высококачественных ледяных кернов были получены в Гренландии и Антарктиде с использованием различных версий этого снаряда [20]. Условные обозначения: 1 — насос для циркуляции промывочной жидкости и транспортирования ледяного шлама в шламоприемный отсек; 2 — буровая коронка с тремя резцами для разрушения льда и обуривания керна; 3 — секция с приводным двигателем и электроникой; 4 — распорное устройство с тремя плоскими пружинами для удерживания от вращения верхней части снаряда; 5 — шламоприемный отсек: буровая жидкость проходит через пустотелый вал, отфильтровывается и возвращается к забою; 6 — колонковая труба для вмещения керна; при ее вращении спирали на наружной поверхности помогают удалению шлама с забоя скважины.



Листовая пружина, прикрепленная к колонковой трубе для регулирования наклона ствола скважины.

Фото С.Б.Хансена; www.eastgrip.org

ли пилотную скважину до глубины 109 м. Эта скважина при помощи специальных расширителей разбуривалась несколько раз, чтобы вместить громоздкие стеклопластиковые трубы, из которых составлена обсадная колонна. Но при расширении на конечном диаметре снаряд застрял на глубине 6 м, и извлечь его получилось, только залив в скважину горячий раствор этиленгликоля, расплавивший ледяной сальник вокруг снаряда. Видеоинспекция места аварии показала, что из-за гликоля в скважине образовалась большая каверна, которая не позволит распорному устройству зацепиться за стенки скважины. В связи с недостатком времени было решено отложить окончательный этап расширения скважины и установки обсадной колонны до следующего сезона.

В сезоне 2017 г. обсадную колонну успешно спустили, и на устье установили оборудование для глубокого бурения: лебедку, мачту и новый пульт контроля. Затем скважину частично заполнили промывочной жидкостью и продолжили бурение снарядом Hans Tausen с призабойной циркуляцией. Несмотря на различные осложнения, к концу сезона скважина достигла глубины 893 м. Одной из основных проблем стало увеличивающееся отклонение ствола скважины от вертикали: уже на глубине 560 м угол наклона достиг 5.6° . Для его уменьшения к нижнему концу наружной невращающейся колонковой трубы была прикреплена короткая листовая пружина. Поскольку ориентация снаряда в скважине всегда случайна, перед началом бурения над забоем снаряд опускали и приподнимали несколько раз, чтобы убедиться, что пружина находится сверху (определяли это по данным инклинометра, встроенного в снаряд). Задача этой пружины в том, чтобы при бурении подталкивать снаряд к низлежащей стенке скважины. Этот метод оказался эффективным, и наклон скважины удалось снизить до 2.5° .

Научный план проекта EGRIP предусматривал получение кондиционного качества керна по все-



Буровая траншея EGRIP, июль 2017 г. На переднем плане буровая лебедка с электромеханическим кабелем. Также показаны буровая мачта (в центре) и кабина оператора бурения (справа).

Фото П.Г.Талалая; www.eastgrip.org

му разрезу скважины, особенно в интервале так называемого хрупкого (взрывающегося) льда, где, как показал опыт бурения всех глубоких скважин в Антарктиде и Гренландии, керн после извлечения из колонковой трубы самопроизвольно раскалывается на мелкие куски и линзы. Эта зона начинается с глубины в несколько сотен метров ниже поверхности ледяного покрова и простирается до 1000–1500 м. Плохое качество керна в зоне хрупкого льда — большая проблема для геохимических и структурных исследований. Чтобы уменьшить хрупкость, нужно избегать воздействия на лед высоких температур (минус 10–15°C), поэтому выбуренный керн сразу переносили в холодную лабораторию, где постоянно поддерживалась температура около –30°C — примерно такая же, как непосредственно в интервале хрупкого льда. Это относительно простое усовершенствование позволило значительно улучшить качество керна.

В сезоне 2018 г. бурение продолжалось в штатном режиме. Однако, несмотря на попытки усовершенствования системы циркуляции бурового снаряда, часть шлама после каждого рейса оставалась в скважине, и промывочную жидкость необходимо было очищать по всему стволу во время специально организованных ночных смен. В тот сезон буровые работы завершились на глубине 1754 м.

В последний полевой сезон 2019 г. возникли новые проблемы, связанные с трудным отрывом керна от забоя скважины. После проходки на длину колонкового набора (обычно на 3–3.5 м) ледяной керн должен быть отломан в конце рейса и поднят на поверхность. Обычно это делается тремя кернорвателями рычажкового типа, интегрированными с буровой коронкой. Когда проходка заканчивается и снаряд поднимают, режущие кромки кернорвателей внедряются в керн и инициирует его отрыв.

При бурении верхнего интервала скважины усилие отрыва керна, как и ожидалось, не превышало 15–16 кН. Но глубже 1800 м оно стало резко возрастать, достигая 21–22 кН, что уже близко к разрывному усилию достаточно изношенного электромеханического кабеля, на котором подвешен снаряд. Причина этого явления неясна. В предыдущих проектах глубокого бурения также наблюдались сложности с отрывом керна на глубоких горизонтах из-за увеличения размеров зерен льда (как в скважине 5Г на станции Восток [21]) или вследствие увеличения температуры льда почти до точки плавления (например, в скважине EPICA-DML [22]). В скважине EGRIP на этих глубинах таких явлений нет. Тем не менее на глубине 1940 м кабель все-таки отсоединился от бурового снаряда, и тот остался на забое скважины. Раньше со снарядами Hans Tausen такого никогда не происходило. К счастью, кабель оказался цел, на нем не обнаружили каких-либо перегибов или других повреждений.

Для спасения снаряда к концу кабеля прикрепили запасное распорное устройство с крюком на нижнем конце. Этот нехитрый ловильный инструмент опустили на забой скважины в надежде, что он зацепится за полукольцо в верхней части аварийного снаряда. Оно специально было спроектировано для ловильных операций, но по назначению до этого случая никогда не использовалось. Крюк многократно опускался вниз до соприкосновения со снарядом и поднимался вверх, но желаемого увеличения нагрузки на кабель не происходило. Это означало, что крюк не цепляется за снаряд.

После двух дней безуспешных работ крюк подняли на поверхность и повернули на 180°, а затем снова опустили в скважину. Понятно, что ориентацию крюка невозможно контролировать на его почти двухкилометровом пути вниз по скважине, но каким-то непостижимым образом эта уловка сработала. На пятой после такой перестановки попытке крюк зацепился за аварийный



Ловильные операции в скважине EGRIP: слева — крюк, прикрепленный к распорному устройству; справа — аварийный снаряд, поднятый из скважины.

Ледяной керн, высовывающийся из снаряда после его подъема. На поверхности льда кернорвателями прорезаны две продольные канавки.

www.eastgrip.org

Фото Н.Жана; www.eastgrip.org

снаряд. После осторожного подъема орудие лова вышло на поверхность с подвешенным снизу снарядом. На следующий день буровые работы были продолжены.

Сломать керн перпендикулярно его оси легче, чем оторвать вдоль, потому что прочность льда на сдвиг в 1.2–1.3 раза меньше его прочности на растяжение. Следовательно, нужно было создать дополнительное сдвиговое усилие у основания керна. Решили использовать два кернорвателя вместо трех, чтобы уменьшить силу, необходимую для отрыва керна от дна скважины. К сожалению, эта модернизация не дала желаемого результата, и кернорватели продолжали вырезать длинные канавки на поверхности керна перед его неконтролируемым отрывом.

В нескольких последующих рейсах проблема отрыва керна только усугубилась, и риск застревания снаряда на забое скважины увеличился. Поэтому было принято решение прекратить глубокое бурение в 2019 г. и использовать межсезонье для разработки новых методик и инженерных решений этой проблемы. Конечная глубина 2019 г. составила 2122.4 м. До основания ледяного покрова остается еще более 400 м.

Планы на будущее

В 2020 г. из-за эпидемии коронавируса организационный комитет проекта EGRIP принял решение отменить полевой сезон. Продолжение бурения отложено на год. Достичь ложа ледника, которое находится, напомним, на глубине 2550 м, запланировано в следующие один-два полевых сезона.

Проблем с бурением так называемого теплого льда в нижней части ледяного покрова не ожидается. Как известно, его температура увеличивается с глубиной и около ложа достигает значительных, близких к точке плавления льда под давлением [23]. Трудности бурения теплых льдов характерны для большинства проектов глубокого бурения в Антарктиде и Гренландии. Однако в предыдущем проекте NEEM этих проблем удалось избежать за счет использования новой промывочной жидкости на основе эфира [24]. Эта маслянистая и вязкая жидкость, по-видимому, не позволяла влажному ледяному шламу налипать на поверхность буровой коронки, что вызывало проблемы с проходкой и прихватами снарядов в других проектах. Эта же «антикоагулянтная» промывочная жидкость используется и в проекте EGRIP.

Возможные проблемы, которые могут быть вызваны деформацией ствола скважины, находят-

ся в стадии обсуждения. Скорее всего, она окажется наиболее высокой на глубоких горизонтах. Однако кривизна скважины, как предполагается, останется относительно небольшой, поэтому буровой снаряд длиной более 10 м не застрянет в уже пробуренных участках. Для того чтобы измерить деформацию поперечного сечения ствола скважины планируется использовать новый многоплечий каверномер, который сможет определять эллиптичность скважины.

Придонная часть ледяного покрова, по всей вероятности, будет образована мореносодержащим льдом, имеющим вертикальную протяженность до десятков метров. Этот лед отличается от вышележащего не только содержанием моренного материала (обломков горных пород), но и структурой, свойствами, составом растворенных веществ и газов [25]. Как правило, обломки имеют небольшие размеры, аналогичные размерам ила либо песка, с редкими частицами до нескольких сантиметров в диаметре. Содержание частиц может варьировать от сотых долей до нескольких процентов по весу. Для проходки через мореносодержащий лед рассматриваются два метода — по аналогии со скважиной NEEM [26]. Первый вариант предполагает установку резцов из твердосплавного материала на стандартную буровую коронку снаряда Hans Tausen. Во втором случае бурение будет осуществляться с использованием обычного колонкового набора геологоразведочного бурения, присоединенного к моторной секции снаряда.

Вполне вероятно, что под ледником в месте бурения свободная вода существует в виде дренажных путей и даже озер и рек [27]. Физические условия существования подледной среды остаются малоизученными, несмотря на последние достижения в области радиолокации и сейсморазведки. Существует два сценария взаимодействия между скважиной и подледниковой водой. Если гидростатическое давление промывочной жидкости окажется ниже давления подледниковой воды, то она станет подниматься вверх, в скважину. В таком случае вода довольно быстро замерзнет и затруднит дальнейшие подледниковые исследования. Высота подъема воды в скважине зависит от перепада давлений в скважине и под ледниковым покровом, и эта величина, к сожалению, плохо предсказуема. Например, во время бурения скважины 5Г и первого проникновения в оз. Восток в Антарктиде в 2012 г. прогнозировали, что вода поднимется в придонной части скважины на 30–40 м, но на самом деле поднялась она гораздо выше. Первые признаки замерзания озерной воды

были обнаружены на расстоянии около 587 м от дна ледяного покрова [28]*.

Во втором сценарии гидростатическое давление промывочной жидкости окажется выше, чем давление подледниковой воды. Тогда промывоч-

ная жидкость станет вытекать из скважины и уровень жидкости будет снижаться до тех пор, пока не установится гидростатическое равновесие. Если процесс пойдет по этому сценарию, то уникальные пробы подледниковой среды взять не получится: реликтовая водная система будет загрязнена промывочной жидкостью. Возможные методы проникновения в подледниковую гидрологическую среду и их последствия все еще находятся в стадии оценки. ■

* Подробнее о бурении на станции Восток и о проникновении в знаменитое подледниковое озеро см.: Талалай П.Г. Вскрытие озера Восток: шаг вперед — два шага назад? // Природа. 2012. №7. С. 3–13.

Проект EGRIP поддерживается финансовыми учреждениями и институтами Дании (фонд А.П.Мёллера и Копенгагенский университет), США (Национальный научный фонд США, Управление полярных программ), Германии (Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований имени Гельмгольца), Японии (Национальный институт полярных исследований и проект «Вызовы устойчивости в Арктике»), Норвегии (Бергенский университет и Бергенский исследовательский фонд), Швейцарии (Швейцарский национальный научный фонд), Франции (Французский полярный институт Поля-Эмиля Виктора и Институт геонаук и экологических исследований) и Китая (Китайская академия наук). Участие Цилинского университета спонсируется программой научно-технической инновационной исследовательской группы (проект №2017TD-24).

Литература / References

1. *Swithinbank C.W.M.* Ice streams. *Polar Record*. 1954; 7(48): 185–186.
2. *Hughes T.J.* West Antarctic ice streams. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1977; 15: 1–46. DOI:10.1029/RG015i001p00001.
3. *Bentley C.R.* Antarctic ice streams: A review. *Journal of Geophysical Research*. 1987; 92: 8843–8858. DOI:10.1029/JB092iB09p08843.
4. *Fahnestock M., Bamber J.* Morphology and surface characteristics of the West Antarctic Ice Sheet. *The West Antarctic Ice Sheet: Behaviour and Environment. Antarctic Research Series*. 2001; 77: 123–136.
5. *Joughin I., Tulaczyk S., Bindschadler R.A., Price S.F.* Changes in West Antarctic ice stream velocities: Observation and analysis. *Journal of Geophysical Research*. 2002; 107(B11): 1–22. DOI:10.1029/2001JB001029.
6. *Bamber J.L., Vaughan D.G., Joughin I.* Widespread complex flow in the interior of the Antarctic Ice Sheet. *Science*. 2000; 287: 1248–1250. DOI:10.1126/science.287.5456.1248.
7. *Engelhardt H., Humphrey N., Kamb B., Fahnestock M.* Physical conditions at the base of a fast moving Antarctic ice stream. *Science*. 1990; 248: 57–59. DOI:10.1126/science.248.4951.57.
8. *Tulaczyk S., Kamb B., Scherer R.P., Engelhardt H.F.* Sedimentary processes at the base of a West Antarctic ice stream: constraints from textural and compositional properties of subglacial debris. *International Journal of Sediment Research*. 1998; 68(3): 487–496. DOI:10.2110/jsr.68.487.
9. *Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B.* Ice flow of the Antarctic Ice Sheet. *Science*. 2011; 333: 1427–1430. DOI:10.1126/science.1208336.
10. MEaSUREs Greenland Ice Sheet Velocity Map from InSAR Data. National Snow & Ice Data Center. 2015. Retrieved June 28, 2017 from http://nsidc.org/data/docs/measures/nsidc0478_joughin.
11. *Walsh K.M., Howat I.M., Ahn Y., Enderlin E.M.* Changes in the marine-terminating glaciers of central east Greenland, 2000–2010. *The Cryosphere*. 2012; 6: 211–220. DOI:10.5194/tc-6-211-2012.
12. *Joughin I., Smith B.E., Howat I.M. et al.* Greenland flow variability from ice-sheet-wide velocity mapping. *Journal of Glaciology*. 2010; 56(197): 415–430.
13. *Vallelonga P., Christianson K., Alley R.B. et al.* Initial results from geophysical surveys and shallow coring of the Northeast Greenland Ice Stream (NEGIS). *The Cryosphere*. 2014; 8: 1275–1287. DOI:10.5194/tc-8-1275-2014.
14. *Dahl-Jensen D., Kirk M., Larsen L.B. et al.* Field season 2016. East Greenland Ice core Project (EGRIP) 2015–2020: Establishing the EGRIP drilling camp. Prepared by Ice and Climate Group, NBI for The EGRIP project responsables and participants and Danish and Greenlandic authorities. Copenhagen, 2016.
15. *Keisling B.A., Christianson K., Alley R.B. et al.* Basal conditions and ice dynamics inferred from radar-derived internal stratigraphy of the Northeast Greenland Ice Stream. *Annals of Glaciology*. 2014; 55: 127–137. DOI:10.3189/2014AoG67A090.
16. *Popp T.J., Hansen S.B., Sheldon S.G., Panton C.* Deep ice core drilling performance and experience at NEEM, Greenland. *Annals of Glaciology*. 2014; 55(68): 53–64. DOI:10.3189/2014AoG68A042.
17. *Larsen L.B., Steffensen J.P., Dahl-Jensen D.* Field season report 2011. North Greenland Eemian Ice drilling (NEEM) 2007–2011: NEEM bedrock core drilling and last processing. Prepared by Ice and Climate Group, NBI for the NEEM Steering Committee and Danish and Greenlandic authorities. Copenhagen, 2011.

18. *Steffensen J.P., Larsen L.B., Dahl-Jensen D.* Field season report 2015. North Greenland Eemian Ice drilling East Greenland Ice drilling Project (NEEM/EGRIP): Moving the entire NEEM camp from NEEM site to EGRIP site by overland traverse. Setting up EGRIP camp structures. Prepared by Ice and Climate Group, NBI for The NEEM Steering Committee, EGRIP Steering Committee and Danish and Greenlandic authorities. Copenhagen, 2015.
19. *Johansen S.J., Hansen S.B., Sheldon S.G. et al.* The Hans Tausen drill: design, performance, further developments and some lessons learned. *Annals of Glaciology*. 2007; 47: 89–98. DOI:10.3189/172756407786857686.
20. *Talalay P.G.* Mechanical Ice Drilling Technology. Beijing; Singapore, 2016.
21. *Vasiliev N.I., Talalay P.G., Bobin N.E. et al.* Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and recent events. *Annals of Glaciology*. 2007; 47: 10–23. DOI:10.3189/172756407786857776.
22. *Wilhelms F., Sheldon S.G., Hamman I., Kipfstuhl S.* Implications for and findings from deep ice core drillings — example: the ultimate tensile strength of ice at high strain rates. Physics and Chemistry of Ice. The Proceedings of the 11th Int. Conference on the Physics and Chemistry of Ice, Bremerhaven, Germany, July 23–28, 2006. W.F.Kuhs (Ed.). 2007: 635–639.
23. *Talalay P., Yang C., Cao P. et al.* Ice-core drilling problems and solutions. *Cold Regions Science and Technology*. 2015; 120: 1–20. DOI:10.1016/j.coldregions.2015.08.014.
24. *Sheldon S.G., Popp T.J., Hansen S.B. et al.* Promising new borehole liquids for ice-core drilling on the East Antarctic high plateau. *Annals of Glaciology*. 2014; 55(68): 260–270. DOI:10.3189/2014AoG68A043.
25. *Talalay P.G.* Subglacial till and bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013; 86: 142–166. DOI:10.1016/j.coldregions.2012.08.009.
26. *Popp T.J., Hansen S.B., Sheldon S.G. et al.* Drilling into debris-rich basal ice at the bottom of the NEEM (Greenland) borehole. *Annals of Glaciology*. 2014; 55(68): 199–206. DOI:10.3189/2014AoG68A029.
27. *Bowling J.S., Livingstone S.J., Sole A.J., Chu W.* Distribution and dynamics of Greenland subglacial lakes. *Nature Communications*. 2019; 10: 2810. DOI:10.1038/s41467-019-10821-w.
28. *Lukin V.V., Vasiliev N.I.* Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2014; 55(65): 83–89. DOI:10.3189/2014AoG65A002.

Through the Greenland Ice Stream

P.G.Talalay¹, D.Dahl-Jensen², S.B.Hansen², T.J.Popp², J.P.Steffensen², K.-E.Nielsen², N.Zhang¹

¹Polar Research Center, Institute for Polar Science and Engineering, Jilin University (Changchun, China)

²Physics of Ice Climate and Earth, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen (Copenhagen, Denmark)

Glaciers and ice sheets store over two-thirds of Earth's freshwater and are presently greatly contributing to rising sea levels. The main discharge from the Antarctic and Greenland ice sheets is drained through fast-moving ice streams and outlet glaciers. Understanding the behavior of these ice masses, including why a huge mass of ice moves at such high speeds, is essential to predicting their future evolution and future sea-level rises. A deep drilling project at the upper part of the largest ice stream in Greenland, Northeast Greenland Ice Stream, was started in 2015, with the main objective of studying the dynamics of ice flow in an ice stream via ice rheology and deformation studies of the ice core and via borehole observations of basal sliding and borehole deformation. Recently, this borehole reached as deep as 2122.4 m, and the drilling process was often not in the routine mode. The project Steering Committee has decided to cancel the 2020 season in light of the global Coronavirus situation. Drilling to the bedrock at the target depth of ~2550 m is planned for the next one or two field seasons.

Keywords: Greenland Ice Sheet, ice drilling, electromechanical drill, ice core.