

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Быстрое
отступление
ледников
может
привести
к погружению
береговой
линии под воду
раньше, чем
предполагалось

Антарктида исчезает?



Ричард Элли



ОБ АВТОРЕ

Ричард Элли (Richard B. Alley) — профессор Университета штата Пенсильвания, преподает науки о Земле. Более 40 лет изучает покровные ледники, а также консультирует правительство США по различным вопросам климата.



Ледники тают, уровень моря поднимается. Мы уже знаем, что океанская вода продвинется внутрь материков вдоль восточного побережья США, Мексиканского залива и береговой линии по всему миру. Ученые пытаются разобраться в срочном порядке, будет ли «всемирный потоп» намного сильнее, чем предполагалось, поднимется ли океан на много сантиметров вместо нескольких. Встает большой вопрос: мы вступаем в эру еще более быстрого таяния льда? Если так, то в каких масштабах и как быстро? Ответ в значительной степени зависит от того, как гигантский ледник Туэйтса в Западной Антарктиде отреагирует на решительные шаги человечества. А уже от этого будет зависеть, будут ли скаты, курсирующие по приморским улицам, спорткарами одноименной марки или рыбами.

Глобальное потепление — это тающие ледники в высокогорных областях и увеличивающийся объем океанической воды, в то время как исчезает лед на обоих полюсах. В среднем за последние 25 лет уровень Мирового океана поднимается на 0,25 см в год, или на 30,5 см в столетие. Таяние остальных горных ледников мира может поднять уровень моря еще чуть более чем на 30,5 см. Но громадные ледниковые щиты Арктики и Антарктики вмещают потенциал поднятия уровня океана более чем на 61 м; а небольшое воздействие на них может вызвать большие изменения наших берегов. Ледяные барьеры ледников, протянувшиеся на много километров в длину и возвышающиеся на много метров в высоту, могут постоянно раскалываться и исчезать, значительно повышая уровень моря.

Хорошо обоснованные оценки дополнительного подъема уровня моря на данное столетие остаются в диапазоне невысоких значений: скорее всего, 61 см для умеренного потепления и менее 122 см даже в случае сильного потепления. Однако у ученых есть убедительные доказательства, что длительное, устойчивое потепление преуспешит значительно больше в течение грядущих веков. А мир может вступить в эру еще более быстрого таяния ледников, если кромки ледяных покровов начнут отступление.

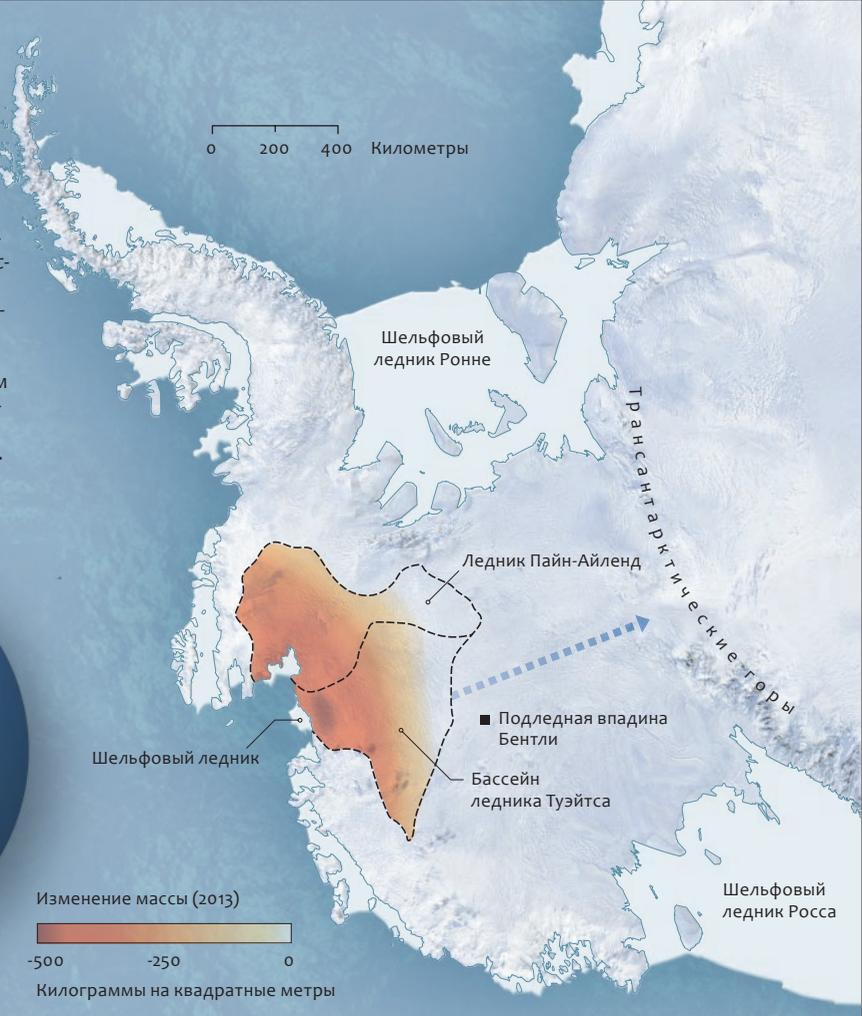
Чтобы узнать, может ли это случиться, поищем подсказки в изменениях, происходящих сегодня, используя достоверные знания о прошлом Земли и физике льда. Многие из загадок можно почерпнуть из драматических изменений, что начались

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Крупные ледники Гренландии, такие как Якобсхавн, быстро текут в океан, вызывая слабое поднятие уровня моря.
- Ледник Туэйтса в Западной Антарктиде, гораздо больших размеров, также начал ускорять свое движение. Решающий фактор его дальнейшей судьбы заключается в том, будет ли он отступать в глубокую подледную впадину Бентли.
- Если он отступит, то образуется очень высокий ледяной барьер, который может обрушиться в океан. Если ледник Туэйтса начнет обрушиваться, уровень океана может подняться на 3,35 м всего за несколько десятков лет.

Подъем уровня Мирового океана

Маленькие ледники стекают с разных сторон Западной Антарктиды и при таянии могут слегка поднять уровень моря. Но настоящие обширные ледники, как Пайн-Айленд и ледник Туэйтса, представляют гораздо более серьезную угрозу (основная карта). Ледник Туэйтса начинает истончаться; лед стекает в море, а передний край отходит назад внутрь материка (рис. на карте). Широкая подледная впадина Бентли, расположенная за ледником Туэйтса, может продвинуть его отступление до Трансантарктических гор, от чего уровень моря может подняться на 3,35 м.



SOURCES: "HOW MUCH, HOW FAST: A SCIENCE REVIEW AND OUTLOOK FOR RESEARCH ON THE INSTABILITY OF ANTARCTIC'S THINNING GLACIER IN THE 21ST CENTURY," BY T. A. SCAMBOS ET AL., IN GLOBAL PLANETARY CHANGE, VOL. 153 (JUNE 2017), SUPPLEMENT'S RECORD HISTORY OF TWENTY-FIRST-CENTURY RETREAT OF FINE ISLAND GLACIER," BY J. A. SMITH ET AL., IN NATURE, VOL. 541 (JANUARY 5, 2017); NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL (starways); Map by Mapping Specialists; Illustration by Ben Olliland

Как разрушить ледниковый покров

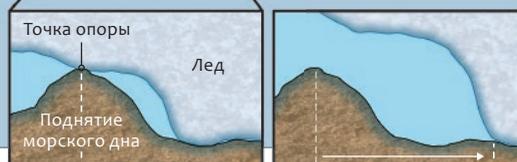
Новый снегопад наращивает снежный покров, а лед течет под действием силы тяжести собственного веса в море и тает (рис. слева). Покровные ледники Западной Антарктиды теряют чуть больше своей массы, чем приобретают, поднимая уровень моря. Шельфовый ледник, плавающий в океане у переднего края покровного ледника, замедляет его сток, но если теплые воздух и вода разрушат шельфовый ледник, то стекание покровного ледника усилится, и он станет

тоньше (рис. справа). Передняя кромка ледника отступает, и точка опоры на грунт, где лед контактирует с дном океана, отступает вместе с ней. Если за этой точкой существует глубокая котловина, то отступление продолжится беспрепятственно, значительно повышая уровень моря, пока ледник не натолкнется на следующее возвышение во внутренней части или не повиснет на выступе морского дна (фрагмент).



Перепрыгивая через уступы

При отступлении покровный ледник может зацепиться за поднятие морского дна, или выступ, создавая трение и задерживая теплую воду, вызывающую таяние нижней части ледника. Если отступающий ледник преодолевает барьер, трение падает, а вода получает открытый доступ.



около двух десятилетий назад на леднике Якобсхавн, важной части всего Гренландского щита. Ледники стекают под действием силы тяжести собственно веса в направлении океана, где передние кромки тают или обламываются, замещаясь потоком льда, идущим вслед. Когда потери опережают поток сзади, передние кромки отступают, при этом ледяной щит на суше сжимается, а уровень моря повышается.

В 1980-е гг. ледник Якобсхавн был известен как один среди самых быстрых, устремившихся к морю Баффина, хотя он удерживался шельфовым ледником, его продолжением, плавающим на поверхности моря. В 1990-х гг. потепление океана на 1,8 градуса по Фаренгейту (1° C) разрушило шельфовый лед, а наземный ответил удвоением скорости сползания на берег. Сегодня Якобсхавн интенсивно истончается и отступает, он один из самых больших обособленных участников поднятия уровня Мирового океана. Из исторической геологии местности известны сопоставимые события в прошлом. Из настоящих наблюдений явствует, что идет своим ходом подобная деятельность, преобразующая другие ледники Гренландии.

Если ледник Туэйтса, значительно больших размеров, последует примеру Якобсхавна, то есть вероятность, что он и прилегающие ледники разрушатся в течение нескольких десятилетий и тогда уровень моря поднимется на 3,35 м. То есть мы на краю опасности катастрофического поднятия уровня океана? Или этот риск слишком преувеличен? Как мы узнаем, как поведет себя ледник Туэйтса? Данные поступают прямо сейчас.

Прибрежные вафли

Вычисление поведения ледника Туэйтса — сложная задача. Чтобы понять это, обратимся к процессу приготовления завтрака. Когда вы льете жидкое тесто на вафельницу, весь купол распределяется по клеточкам железной решетки. В физическом смысле вес теста выталкивает купол наружу вопреки силе трения о решетку снизу. Растекание замедляется при выпечке по мере загустения теста или когда вы придерживаете его лопаткой.

Ледниковые покровы подобны большим вафлям, достигающим 3 км в толщину и простирающимся по всей площади континентов. Снежные осадки выпадают на поверхность и сжимаются в лед под действием силы тяжести последующих снегопадов. Образующиеся огромные ледяные купола



Талая вода вливается в Гренландский ледяной щит, ускоряя его сползание в море, — примета положения дел и в Антарктиде

достаточно крепки. Я приземлялся на них на тяжелых, оборудованных лыжами военно-транспортных самолетах, и они до сих пор целы. Их температура чаще всего колеблется в пределах нескольких градусов вокруг точки таяния, лед при этом достаточно мягкий и медленно течет с высоты центральной части к краям, где он легче тает и откалывается. Более мощные и крутые купола, такие как в Гренландии и Антарктиде, стекают быстрее.

Сам по себе ледниковый покров растет до тех пор, пока не станет достаточно высоким и крутым, чтобы начать растекаться, таять и откалываться, приходя в равновесие с продолжающимся дополнительным снегопадом. Ледяной купол может сохранять свои размеры длительное время. Но это не относится в целом к нашей теплеющей планете. Запас влаги ежегодных снежных осадков Гренландии и Антарктиды почти полностью обязан морской стихии и равен слою воды, испарившейся с поверхности всех океанов, — чуть

более 0,63 см. В настоящее время ледниковые покровы возвращают приблизительно на 15% больше этого количества посредством талой воды или обрушения айсбергов, в результате уровень океана поднимается ненамного. Если таяние будет превышать выпадение снега в течение длительного времени, то ледниковый покров скорее всего исчезнет. При нынешних темпах это может занять почти 100 тыс. лет. Тем не менее если потепление будет нарастать, то таяние ускорится. Такую картину мира мы наблюдаем сегодня.

Ужасная красота

Ледниковый поток зависит от крепости его строения, степени сцепления с подстилающей поверхностью, а также от того, есть ли у него поддержка — прилегающий плавающий шельфовый ледник. Общее атмосферное потепление может размягчить лед и растопить его в местах, где днище ледника примерзло к нижележащим породам, позволяя льду скользить быстрее в направлении моря. Но потребуются много времени, чтобы тепло могло проникнуть сквозь трехкилометровую толщу. Крупные покровные ледники еще не окончили разогрев в результате подъема температуры воздуха, прекратившего последнее оледенение более 10 тыс. лет назад.

Более быстрый способ согреть ледник и его ложе заключается в том, чтобы вода, растаявшая наверху, просочилась в трещины. В некоторых местах на склонах ледников Гренландии талая вода собирается в обширных углублениях на поверхности, образуя большие красивые голубые озера. Будучи плотнее льда, вода стремится пробиться в открытые трещины, которые могут достигать дна, и таким образом спускает озера. Растущее озеро может прорваться сквозь полукилометровую и глубже толщу льда, образуя поток воды мощнее Ниагарского водопада. За час такой прорыв воды может согреть ложе так же сильно, как это могло бы произойти за 10 тыс. лет.

Это процесс важен для изучения. Но он не вызывает серьезной тревоги у жителей побережий, поскольку неровности ложа могут также удерживать лед от ускоренного движения в море.

Однако подобный процесс представляет большую угрозу в случае шельфового ледника. В очень холодных местах ледник, стекающий в океан, остается и прикреплённым, и плавающим. Шельфовые ледники почти всегда присутствуют в защищенных бухтах или фьордах. Движение шельфового льда тормозится здесь трением вдоль береговой линии и, возможно, о торчащие донные выступы, где лед касается грунта. Шельфовый ледник задерживает наземный ледяной сток в море.

Теплый воздух может стать причиной образования ледяных озер на вершине шельфовых

ледников. При прорыве озер через трещины ледник может распасться. Например, шельфовый ледник Ларсена В на Антарктическом полуострове, к северу от ледника Туэйтса, в 2002 г практически полностью распался всего за пять недель, когда от него откалывались и опрокидывались айсберги, как домино. Вследствие этого уровень моря не поднялся сразу, ведь шельфовый ледник уже был на плаву, но его потери способствовали ускорению сползания наземной части ледника в океан, как будто вы убрали лопатку — и тесто заскользило вниз. Лед потек в шесть-восемь раз быстрее, чем он продвигался ранее. К счастью, на узком Антарктическом полуострове масса наземной части шельфового ледника Ларсена В была невелика, поэтому уровень моря поднялся незначительно. Но это событие заставило людей задуматься, что шельфовые ледники могут разрушиться очень быстро, выпуская ледники, которые они сдерживали. Шельфовые ледники могут также подтаивать снизу за счет подогрева морской водой, как это случилось с ледником Якобсхавн.

При потере шельфового льда айсберги отрываются прямо от ледниковых обрывов, обращенных к морю. Хотя от этого зрелища туристы на круизных судах, курсирующих вокруг Аляски и других точек мира, приходят в восторг, оно свидетельствует о приближении гибели покровных ледников. С ледяного барьера Якобсхавна сегодня обрушиваются айсберги, возвышающиеся над океаном более чем на 90 м, величиной с 30-этажный небоскреб, при этом подводная часть в девять раз больше. Если такие айсберги перевернутся, то вода вздымается вверх на 50 этажей, а возникшее в результате землетрясение могут засесть службы США.

До сих пор деградация шельфовых ледников и обрушение ледяных барьеров умеренно действовали на подъем уровня океана. Но этот процесс у ледника Туэйтса может вызвать драматические последствия, поскольку геологическая история распорядилась так, что ледник расположен на краю перегиба, где он может опрокинуться в огромную подледниковую впадину Бентли.

Перепрыгивая через уступы

Однажды осенним утром 1956 г. Чарльз Бентли (Charles Bentley), позже ставший консультантом моей диссертации, защитил диплом в Колумбийском университете. На следующий день он вскочил в поезд, идущий в Панаму, затем пересел на корабль, держащий курс на юг, для участия в исследованиях планеты Земля в рамках проекта, посвященного Международному геофизическому году. Бентли провел два года в Западной Антарктиде, прежде чем обнаружил по возвращении, что не окончил университет, поскольку не была внесена плата за обучение. Но за это время он и команда

преодолели более 4830 км по льду в округе научно-исследовательской станции Бэрд и в длинных маршрутах по Западной Антарктиде. (Чарльз Бентли умер в возрасте 87 лет в 2017 г.)

Среди множества измерений и открытий, которые они сделали, нам более всего важны те, что относятся к толщине льда. Они произвели несколько небольших взрывов на поверхности и с помощью сейсмографов проследили за прохождением звука сквозь толщу ледника и его отражением от дна. Полученные данные показали, что Западная Антарктида — не тонкая полоса льда, покрывающая высокий материк, как некоторые считали ранее. Напротив, Бентли и его команда обнаружили очень толстый слой льда и открыли подледниковую впадину Бентли. Она уходит вглубь на 2,5 км ниже уровня моря. Это самое глубокое место не под океаном, а на суше. А лед, что заполняет ее, возвышается на 1,6 км и более над уровнем моря.

Бентли и гляциологи, работающие с ним, нашли точку перегиба. Огромная впадина и прилегающие котловины лежат в основании обширного центра Западно-антарктического ледникового щита. Если передний край ледника Туэйтса отойдет назад от берега моря в сторону впадины, он может образовать ледяной барьер высотой в тысячи метров, от самой вершины ледника над впадиной и на всю ее глубину. Такой обрыв, гораздо мощнее, чем у Якобсхавна и любого другого ледника в мире, может быстро расколоться, создавая невероятные высокие айсберги, которые могут опрокидываться и уплывать через проем впадины в океан, значительно поднимая его уровень.

Десятилетия дополнительных научных изысканий доказали, как важно было изучить этот процесс. Джон Андерсон (John Anderson), который недавно ушел на пенсию после 43 лет работы в Университете Райса, и многие из его аспирантов неустанно картировали материковую отмель Антарктиды с помощью гидролокатора бокового обзора и других инструментов. Во время ледниковых эпох антарктический лед распространялся на много километров дальше во всех направлениях и отступал в период их окончания. Нынешнее дно океана вокруг Антарктиды в прошлом представляло собой ложе ледника.

Ярко выраженные отпечатки, оставленные в донных отложениях, рассказывают подробности о ледниковых щитах.

Одна из историй повествует, как распространяющиеся ледниковые щиты сползали к морю, таща с собой осадочный материал. Когда ледник доходит до местного поднятия дна, он стабилизируется и, нагромождая осадки, надстраивает поднятие, создавая моренные гряды, длинные каменистые валы, вырастающие на конце ледника, и, соответственно, отмели. Лед может оставаться в таком положении сотни и тысячи лет, отражая

слабые попытки его переместить. Но при достаточном потеплении ледник отступает по наклонному пласту вниз в углубление за грядой. Ледник редко останавливается снова, пока не наткнется на очередную высокую гряду, часто далеко расположенную. В это время айсберги плавают над заброшенной моренной грядой, все еще покрытой морской водой и выступающей в океан.

Такое явление часто можно наблюдать вокруг Антарктиды и Гренландии. Ледник Якобсхавн «перепрыгнул» через аналогичный вал бывшей морены и отступает через узкий фьорд, открывая подступ к еще большему покровному леднику. Когда европейцы впервые исследовали район, ныне известный как бухта АЙСИ-БЕЙ на Аляске, он был покрыт огромным ледником, заканчивающимся большой мореной. С тех пор ледник отступил от той гряды, или выступа, более чем на 97 км вглубь района, чтобы задержаться у следующего возвышения, которое сегодня стало берегом красивого залива.

По счастью, большинство подобных отступлений имеют ограниченное воздействие на уровень Мирового океана. Даже большой ледник размером с бухту АЙСИ-БЕЙ будет мал по сравнению с Мировым океаном. Ледник Якобсхавн входит в десятку крупнейших выводных ледников Гренландского ледяного щита, но все они нарушают равновесие своих соседей в прилежащих фьордах не быстро и уходят не слишком глубоко внутрь, где ложе поднимается вновь. Аналогичным образом Антарктида дренируется множеством ледников, сползающих в свои долины — решетки стока, похожие на вафельницы. При достаточном потеплении многие из них, вероятно, отступят в унисон, но каждый сам по себе не окажет серьезного влияния на уровень моря в глобальных масштабах.

Совсем другую историю представляют впадина Бентли в Западной Антарктиде и несколько других внутренних районов Восточной Антарктиды, в том числе бассейны Уилкса и Аврора. Отступление через одно из этих понижений к следующей высоте может приобрести глобальное значение. Модели указывают, что ледник Туэйтса с максимальной вероятностью двинется во впадину Бентли и соединительные бассейны. Если он начнет «распаковываться», двигаясь со скоростью ледника Якобсхавн, то уровень моря может подняться на 3,35 м до того, как он вернется в равновесие на высокой точке другой стороны впадины. Бассейны Восточной Антарктиды самостоятельно могут поднять уровень океана больше, чем мог бы ледник Туэйтса, но им необходимо больше тепла, чтобы их ледники преодолели свои высоты.

Отметим, что в таком развитии событий нет ничего аномального. При достаточном потеплении ледник обычно отступает до следующей высоты. Это наблюдалось много раз. Если ледник Туэйтса

получит довольно тепла, чтобы начать действовать, как ледники Гренландии и Аляски, то он должен отступить.

Будущее с трещиной?

Как быстро сможет продвигаться ледник Туэйтса? Какой вклад в потепление мы можем совершить до этого момента? Мой коллега из Университета штата Пенсильвания Дэвид Поллард (David Pollard) и Роберт Де Конто (Robert M. DeConto) из Массачусетского университета в Амхерсте на современных быстрых компьютерах сконструировали модель течения ледника в соответствии с физическими данными, чтобы можно было изучить крупные изменения ледяных покровов на протяжении длительного времени. Я немного им помог с введением физических параметров отламывания айсбергов от высоких береговых обрывов после откола шельфовых ледников, особенно при прорыве поверхностных талых вод в ледниковые трещины.

Поллард и Де Конто усовершенствовали модель, внося данные о геологическом прошлом и оценке влияния антропогенного потепления различной величины. Они определили, что у нас, вероятно, есть в запасе несколько десятилетий даже при условии быстрого потепления до того, как наступит распад ледника Туэйтса, вызванный потерей шельфового ледника и работой талых вод, расширивших расселины. До полного его исчезновения пройдет, возможно, лет сто. На самом деле они не знали, как быстро может разрушиться ледник, но они заложили максимальную скорость, исходя из движения ледника Якобсхавн в Гренландии. (Однако тот вскоре стал двигаться быстрее.) Поскольку ледник Туэйтса мощнее, то и обрывы на нем могут быть выше, чем на Якобсхавне. Более высокие обрывы, как правило, осыпаются быстрее (вот почему инженеры-дорожники обычно оставляют склоны не очень крутыми). Таким образом, мы можем недооценивать худший вариант развития событий, но мы действительно его не знаем.

Поллард и Де Конто построили хорошую модель, но это, безусловно, еще не последнее слово. Остается надежда, что, например, ледник Туэйтса может прийти в состояние равновесия на выступе ниже по склону, прямо за его нынешней позицией, не отступая далее; или что айсберги могли бы отколоться и на какое-то время создать нагромождение за существующим гребнем, где сейчас ледник переходит в плавающее состояние, преобразуя шельф таким образом, чтобы потери льда стали меньше.

Чтобы найти ответы на эти и другие вопросы, Национальный научный фонд США и Антарктическое управление Великобритании совместно с другими сотрудничающими международными организациями направили основные усилия на дальнейшее изучение ледника Туэйтса — как он движется сегодня, над каким участком дна, —

чтобы всем нам удалось лучше представить его будущее. Эти данные определенно помогут исключить неточности и будут представлять интерес.

Все же на некоторые вопросы трудно найти ответ. Представьте себе керамические чашки, падающие на твердый пол. Одни подпрыгивают, другие трескаются, от третьих откалываются кусочки, а есть те, что разлетаются на множество осколков. Физические процессы всех этих разрушений хорошо известны и легко просчитываются, в среднем поведение многих упавших чашек предсказуемо. Но вы бы наверняка не захотели делать ставку на свою карьеру или еще что-то важное, предсказывая судьбу падения следующей чашки на пол.

Будущее ледника Туэйтса во многом зависит от трещин. Будет ли шельфовый ледник отламываться от питающего его ледника, понуждая ледяной покров преодолевать пороги и отступать в глубокие впадины? Будут ли огромные айсберги быстро откалываться, если потери шельфового льда образуют крутой обрыв по наружному краю, который выше всех на свете, при этом заставляя ледник отступать со скоростью, еще не виданной доселе? Талая вода играет важную роль, но сколько воды будет вынесено с речным стоком в море, а сколько просочится в снег и повторно замерзнет? Как быстро потеплеет воздух? Я полагаю, что по сравнению с этим судьбу кофейных чашек предсказывать легко.

Если мировое сообщество сможет мобилизовать все усилия, то замедление и прекращение потепления, вызванного выбросами парниковых газов, остановит подъем уровня океана, снимая бремя увеличивающихся расходов на восполнение ущерба прибрежной зоне. Но если ледник Туэйтса готов к энергичному отступлению, то предотвращение дальнейшего потепления посредством ограничения ущерба, наносимого деятельностью человека, может оказаться гораздо более ценным. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Фокс Д. Свидетельство таяния льдов Антарктики // ВМН, № 9, 2012.
- Oceanic Forcing of Ice-Sheet Retreat: West Antarctica and More. Richard B. Alley et al. in Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 43, pages 207–231; May 2015.
- Contribution of Antarctica to Past and Future Sea-Level Rise. Robert M. DeConto and David Pollard in Nature, Vol. 531, pages 591–597; March 31, 2016.
- How Much, How Fast?: A Science Review and Outlook for Research on the Instability of Antarctica's Thwaites Glacier in the 21st Century. T.A. Scambos et al. in Global and Planetary Change, Vol. 153, pages 16–34; June 2017.