

ЛЕДНИКОВЫЕ КОЛОДЦЫ И ИХ ИЗУЧЕНИЕ НА ЛЕДНИКЕ АЛЬДЕГОНДА, ШПИЦБЕРГЕН

Ледниковые колодцы — это полости во льду, чаще всего имеющие цилиндрическую форму, которые в большинстве случаев уходят вертикально вниз с поверхности ледников. Оценить глубину ледниковых колодцев с поверхности льда затруднительно, поскольку в летнее время в них обрушиваются водные потоки, которые мешают проводить корректные измерения. Большинство исследователей считают, что колодцы всегда достигают ложа ледников, хотя многие из них о таких колодцах лишь слышали, но никогда их не видели, а часть исследователей наблюдали колодцы на ледниках и подходили к ним, но никогда в них не спускались и потому просто не знают, как они устроены. Представление о том, что колодцы достигают ложа ледников, возникло на заре рождения гляциологии, когда первые естествоиспытатели, посещавшие ледники в конце XVIII — первой половине XIX века, видели, что на месте колодцев на краю ледников после отступления льда оставались углубления, выбитые водой в подстилающих ледники горных породах. Именно поэтому считалось, что все колодцы пробивают ледники насквозь. Однако это не всегда так.

Ледниковые колодцы есть практически на всех ледниках, на которых имеется зона абляции, то есть там, где по поверхности ледников текут водные потоки, и в основном там, где имеются трещины во льду. Иными словами, для формирования колодцев в ледниках необходимо наличие текущей воды и трещин во льду, которые поглощают поверхностные водные потоки и отводят воду в глубину льда или под лед в своей нижней части. Если вода из трещины по какой-то причине не отводится в толщу льда, то колодец возникнуть не может. Нередко на ледниках можно увидеть такую картину: текущий по поверхности льда водный поток попадает

в зону растяжения ледника, где могут образоваться трещины, и начинает перехватываться вновь возникшей трещиной, пересекающей поток. В этом случае текущая вода устремляется в трещину. Однако если трещина не имеет стока в своей нижней части, то перехваченная ею вода просто заполнит трещину целиком и начнет из нее вытекать. Трещина, заполненная водой, просуществовав какое-то время, пока не попадет в зону сжатия ледника и не будет полностью уничтожена, не оставив какого-либо заметного следа в толще льда.

Если сток из трещины в том или ином виде имеется, то по ней может сформироваться ледниковый колодец. Те, кто бывал на леднике, видели вертикальные цилиндрические отверстия во льду, в которые падает или раньше падала струя воды. В первом случае это живой колодец, а во втором — мертвый. Обрушивающаяся в колодцы вода создает на ледниках шум, слышимый издали и похожий на шум водяных мельниц, из-за чего ледниковые колодцы нередко называют ледниковыми мельницами.

Как возникают колодцы в ледниках? Итак, вода начинает падать во вновь открывшуюся трещину. Поскольку начальная температура падающего водного потока на поверхности льда выше нулевого значения (обычно 0,1–0,2 °C), то, попадая на стену трещины, вода начинает ее плавить. Из-за этого в месте падения потока образуется выемка во льду, которая отражает поток к противоположной стене трещины. Казалось бы, что на первом же отрезке трещины вода потеряет свой запас тепла и больше не будет растапливать лед. Но это не так. Здесь включается другой механизм — выделение тепла во время падения водного потока при переходе его потенциальной энергии в кинетическую. Это позволяет падающему потоку и дальше продолжать растапливать лед. Именно соприкосновение падающей воды со стенками трещины и позволяет ей локально расширяться в месте падения в нее водного потока. А поскольку через 12–15 м после начала вертикального падения водная струя из-за сопротивления воздуха начинает разрываться сначала на отдельные водные сгустки, а потом и на капли, то водный поток распределяется равномерно по сечению образующегося ледникового колодца, в том числе и стекая по его стенам, стремясь создать цилиндрическую форму вертикального канала. Поэтому происходит равномерное расширение колодца

Вход в ледниковый колодец



Каскад мелких колодцев



во все стороны. Из-за движения ледника трещины смыкаются, но возникший ледниковый колодец сохраняется даже после полного смыкания трещины. В результате возникает вертикальный цилиндрический канал во льду, глубина которого соответствует начальной глубине проникновения ледниковой трещины. Если в тот или иной момент времени мы видим, что на какой-то глубине от поверхности ледника колодец заполнен водой, значит, он образовался до того, как его заполнила вода.

За счет таяния льда на поверхности ледника в летнее время его поверхность понижается, что уменьшает глубину колодца. В то же время падающая вниз на лед дна колодца слегка нагретая вода углубляет колодец, поэтому чаще всего колодцы находятся в равновесии с поступающим в них водным потоком и, вероятно, почти не меняют свою глубину. Глубина колодца начнет меняться, если он потеряет водное питание, когда питающий его поток уйдет в сторону и перестанет попадать в колодец. Колодец после этого отмирает. Сверху его глубина продолжает уменьшаться за счет таяния льда на поверхности ледника, а внизу таяние уже прекратилось из-за отсутствия потока. Мало того, зимой такой мертвый колодец, как и все активные колодцы, будет собирать наметаемый и выпадающий снег. Но только в активном колодце этот снег растает в начале лета под действием падающей воды, а в мертвом колодце наметаемый снег так же будет помогать уменьшать глубину колодца, как и поверхностное таяние. Когда прежний канал выхода воды из колодца будет перекрыт накопившимся снегом, льдом и действиями пластической деформации льда, мертвый колодец станет заполняться водой. За счет холода стен вода в колодце начинает замерзать. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока вся вода в колодце не превратится в лед и он не прекратит свое существование. Поскольку замерзание колодцев происходит не одновременно, то в них образуется слоистая структура наподобие годовых колец у деревьев, по которой можно определить время полного зарастания ледникового колодца.

В зависимости от того, каким путем вода дренируется со дна трещины, в основании колодца формируется субгоризонтальный или наклонный канал, по которому вода уходит в толщу льда или под лед. Проследить с поверхности ледника путь дальнейшего движения воды обычно не удастся. Мало помогают и геофизические методы (например, использование георадаров), поскольку в большинстве случаев их применяют в зимнее время, когда можно использовать снегоходы для транспортировки оборудования на ледники, но движущейся воды в это время в каналах

Вид на спуск в колодец снизу



внутреннего дренажа уже не остается. А именно контраст геофизических свойств воды и льда позволяет однозначно определять положение дренажных каналов внутри ледяной толщи. Именно поэтому большинство модельных построений внутреннего дренажа ледников базируется в основном на предположениях, а не на точном знании. Поскольку даже прямое проникновение в ледниковые колодцы не дает возможности полного исследования всей протяженности каналов внутреннего дренажа, то во многом строение внутренней дренажной сети ледников остается до настоящего времени «terra incognita».

Существует и другой способ образования ледниковых колодцев. В этом случае роль ледниковой трещины играет вертикальная стенка залеченного ледяного каньона, если в него сбоку втекает водный поток. Дело в том, что на ледниках, особенно на тех, где нет трещин (это обычно небольшие ледники с холодным льдом), поверхностные водные потоки, если они не мигрируют ежегодно по поверхности льда, начинают неуклонно врезаться в толщу льда, формируя ледяные каньоны. Обычно глубина каньона увеличивается в направлении языка ледника. Наибольшее углубление каньонов наблюдается на круто наклонных участках ледников в зоне абляции, где этому способствует выделение тепла при переходе потенциальной энергии потоков в кинетическую. На выровненных участках ледников глубина ледниковых каньонов уменьшается. Как было замечено на ледниках, каньоны не могут углубляться в лед бесконечно. Дело в том, что на каньоны начинают действовать силы пластической деформации льда, которые стремятся сомкнуть каньон, когда в нем нет воды, то есть в зимнее время. И с ростом глубины каньона температура окружающего его льда растет, а скорость смыкания канала увеличивается. В верхней части каньон также начинает закрываться наметаемым зимой снегом, в котором замерзает весной талая вода, превращая снег в фирн и лед, который запечатывает ледяной каньон. В результате ледяной каньон превращается во

В галерее на дне колодца



внутриледный канал. Наблюдения на ледниках показали, что обычно глубина таких захороненных ледяных каньонов не превышает 30 м. При большей глубине каньонов они обычно теряют воду и смыкаются под действием пластической деформации льда. Если в такой захороненный каньон сбоку начинает стекать водный поток, то в месте впадения его в каньон формируется колодец, глубина которого не превышает глубины захороненного ледяного каньона. В этом случае поглощенный водный поток частично обновляет систему захороненных каналов, образуя новую систему внутреннего дренажа.

Ледяные каньоны могут впадать в ледниковые колодцы. И если такие каньоны не мигрируют по поверхности ледника, то они начинают углубляться в лед так, что глубина каньона растет при приближении к колодцу. Чем дольше проживет ледниковый колодец, тем больше может быть глубина каньона у впадения его в колодец. Но ни каньоны, ни колодцы на ледниках не являются долгоживущими образованиями. Как правило, время жизни активного ледникового колодца исчисляется периодом в несколько лет.

Ледниковые колодцы могут иметь самую разную глубину, которая зависит от глубины первичной трещины. Как правило, преобладают вертикальные колодцы, возникшие по вертикальным трещинам, которые наиболее часты на ледниках. Если поглощающая поток трещина будет наклонной, то по ней возникает система (каскад) небольших колодцев, разделенных водобойными ямами. Чем круче будет трещина, тем больше будет глубина колодцев в каскаде. При глубине колодцев более 30 м на их дне водобойные ямы, как правило, не формируются, поскольку вода попадает на дно колодца в разбрызганном виде. Наибольшая глубина колодцев на ледниках обычно не превышает 100 м, и только в Гренландии были исследованы ледниковые колодцы глубиной до 200 м.

Спуски в колодцы нередко происходят в осеннее или зимнее время, когда их посещение наиболее без-

опасно, поскольку таяние льда на поверхности ледников прекращается, из-за чего завершается сток поверхностных потоков в ледниковые колодцы. В это время можно спускаться в колодцы, используя альпинистскую технику, и не опасаться падающей сверху струи ледяной воды.

Безопасный спуск в ледниковые колодцы без специальной подготовки невозможен. Для спуска в колодцы и подъема из них необходимо овладеть альпинистской техникой, при этом очень желателен опыт работы со снаряжением в вертикальных полостях в горных породах (например, известняках и доломитах). Кроме этого, необходимо иметь знания об опасностях, которые могут поджидать в ледниковых пещерах. Чтобы спуститься в ледниковый колодец, необходимо выбрать место крепления веревки во льду. Для этого подойдет участок массивного льда на краю колодца. В его пределах на специально выровненных ледорубом участках закручиваются сдублированные ледобурные крючья, на которых с помощью карабинов укрепляется специальная альпинистская капроновая веревка, не имеющая сплеток. Для спуска в колодец по веревке используется спусковое устройство, прикрепленное к нижней обвязке, надетой на человека. Нередко в ледниковых колодцах для большей безопасности используются также промежуточные точки опоры в виде единичных ледобурных крючьев. Отстегнуть веревку можно только на выровненных участках на дне колодцев. Во всех остальных случаях для безопасности необходимо быть пристегнутым. На всех вертикальных участках каскадов мелких колодцев вешаются веревки также за ледобурные крюки. Для подъема по веревкам используется система самохватов (так называемые кроль и жумар), из которых первый крепится неподвижно на груди, а второй — на подвижной педали.

В случае сильного обводнения полости используется легкий гидрокостюм, который человек надевает под комбинезон на теплое белье. Гидрокостюм защищает от промокания в стоячей и льющейся сверху воде, а значит, обеспечивает сохранение тепла. Это особенно важно в случае большого количества каскадов с заполненными водой водобойными ямами и затопленными участками горизонтальных пещерных галерей. Спускаются в колодцы всегда в каске с налобным фонарем, руки должны быть защищены перчатками. На обувь надеваются кошки, чтобы исключить скольжение.

Ледниковые колодцы и пещеры изменяются очень быстро — буквально за недели и месяцы. Поэтому, как и в обычную реку, в одну и ту же ледниковую пещеру невозможно войти дважды. На каждом леднике полость,

Структуры льда на дне колодца



На дне колодца



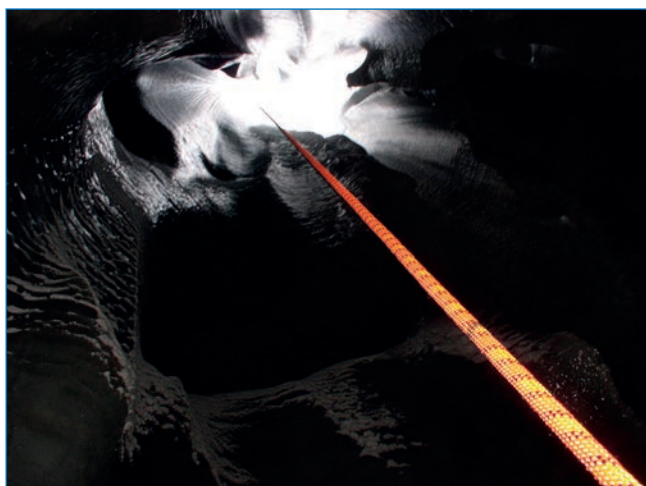
которую мы посещаем раз в год, разительно отличается от прошлогодней. Значит, практически всегда, спускаясь в ледниковый колодец, ты не знаешь, что там тебя ожидает (если только колодец не исследовался несколько раз за несколько дней). Иной раз надеешься на глубокую полость с обширным продолжением, как в предыдущем году, а на деле она завершается на дне неглубокого колодца, заполненного водой, и продолжения не имеет. Есть простой способ в начале спуска узнать, имеет полость продолжение или нет. Для этого, спускаясь по веревке в колодец и еще не зная, что тебя ожидает, достаточно что-то громко крикнуть вниз. Если эхо глухое и быстро затухает, то продолжения полости не будет, а если эхо остается звонким, то полость еще на какое-то расстояние будет продолжаться.

При достаточном количестве снаряжения (веревки и крючья), взятого с собой, полость проходят до самого конца. Обычно это сифон — ход, полностью залитый водой, или глыбовый завал, или непроходимое сужение хода. В некоторых случаях пройти полость до конца не удается, так как просто не хватает снаряжения. А это может произойти из-за того, что мы не знаем, какая конфигурация полости нас ожидает на этот раз и какое снаряжение брать с собой. Лишнего же брать не хочется.

Когда полость пройдена до конца, то на обратном пути в ней начинается топосъемка, которая выполняется для того, чтобы составить карту полости. Поскольку ледниковые полости быстро меняются, то топосъемка проводится при каждом их посещении. Делается она точно так же, как и в обычных пещерах. Для ее выполнения требуются мерная лента, горный компас и два человека. Мерной лентой отмеряется расстояние по ходу между пикетами, а компасом — азимут хода и угол наклона ленты. В журнал топосъемки заносятся: номер пикета, расстояние между пикетами, азимут, угол наклона ленты, расстояние влево, вправо и вверх, а также производится зарисовка поперечных сечений канала у пикетов, если есть разветвленная сеть галерей, то зарисовывается и абрис. Желательно, чтобы журнал топосъемки был изготовлен из непромокаемых материалов. Топосъемка каждый раз делается для того, чтобы получить картину изменения полости во времени, то есть понять эволюцию полости и связать ее с изменениями вмещающего ее ледника.

На архипелаге Шпицберген мы спускались в колодцы на ледниках Ааватсмарк, Лонгйир, Тавле и Альдегонда, хотя находили их почти на всех ледниках, которые посещали. Наибольшее количество спусков происходило в колодцы ледника Альдегонда, так как для их посещения была

Вид на колодец снизу



наиболее простая логистика: можно было базироваться в красном домике на западном берегу Грэн-фьорда, расположенном в 2 км от языка ледника, кроме относительной близости колодцев, наличие домика позволяло при возвращении с ледника не только полноценно отдохнуть в тепле, но и высушить промокшее снаряжение. Также из-за небольших размеров ледника и отсутствия открытых трещин передвижение по нему не требовало много времени. Колодцы на леднике в глубину не превышали 75 м, но имели такую особенность: ни они сами, ни каналы, отходящие от их нижней части, никогда не достигали ложа ледника. Мы связываем это с тем, что в основании ледника располагается внутриледная плоскость надвига, по которой и движется лед. Вода через ледниковые колодцы попадает на плоскость надвига и далее вдоль нее движется к языку ледника, не достигая ложа.

Мы изучали ледниковые колодцы на леднике Альдегонда с 2001 года по настоящее время. Иногда за экспедицию удавалось посетить несколько ледниковых колодцев, а иногда — ни один из них по разным причинам. Наибольшей проблемой оказывались погодные условия. Так как ледниковые колодцы можно было безопасно посещать только в морозную погоду, то отсутствие холодов не позволяло это сделать. Наши экспедиции на Шпицберген обычно проходили в сентябре, когда холода могли устанавливаться во второй половине периода, но в последние годы этого часто не происходило, что делало спуски в колодцы невозможными. В любом случае отсутствие продолжительных холодов, в течение которых вся вода в колодцах могла бы полностью исчезать, заставляло спускаться в колодцы в гидрокостюмах, что требовало дополнительного приложения сил, особенно на подъеме, поскольку даже легкие гидрокостюмы сковывают движения. В летнее время можно было посещать только мертвые колодцы, потерявшие водное питание. Признаком возможности спуска в колодцы было прекращение стока из пещер на языке ледника.

У сифона



На леднике Альдегонда были исследованы в разное время три группы ледниковых колодцев, расположенные у левого борта, в центре и у правого борта ледника. Колодец у правого борта посещался почти ежегодно с 2003 по 2010 год. При этом глубина входного колодца в разные годы была почти постоянной — около 55 м. От дна колодца отходила слабо наклонная меандрирующая галерея шириной от 1 до 1,5 м, высота 2–4 м. Галерея иногда перемежалась ступенями по 2–4 м, где требовалась навеска небольшой веревки. В галерее доходили до сифона или не доходили из-за нехватки веревок. Из-за зимовки в Антарктике в 2010–2012 годах на ледник Альдегонда попасть не удалось. После этого перерыва посещение ледника показало, что этот колодец полностью умер и заполнился водой, но на 100 м ниже по леднику возник новый колодец, который удалось исследовать только в 2016 году. Входной колодец тоже имел глубину около 55 м, но меандрирующая галерея была шириной 0,6–0,7 м, и, похоже, ближе ко дну полость соединилась с каналами предыдущего колодца. В нижней части галерея была полностью забита шугой. Больше этот колодец посетить не удавалось.

Группа колодцев в средней части ледника имела самую большую глубину, достигавшую в разные годы 70–75 м. Встречались здесь и более мелкие колодцы. Самым впечатляющим оказался колодец, обнаруженный в 2016 году, когда ширина колодца наверху достигала 10 м, а в основании, на глубине — от 70 до 30 м. Но обычно протяженных ходов от основания колодцев не было; они были арочными высотой до 3 м и шириной до 5 м. Всегда ходы на дне глубоких колодцев заканчивались сифонами. В 2004–2006 годах в колодцы этой группы мы совместно с сотрудниками ААНИИ бросали краску, чтобы определить место выхода воды из колодцев. Чтобы точно определить скорость прохождения краски внутри ледника, вместе с красителем в воду бросали 10–15 килограммов поваренной соли. Оказалось, что вода, которую поглощали колодцы этой группы, выходила у левого борта ледника.

Эксперимент по трассированию воды



Как только краска начинала выходить, включали кондуктометр, что позволяло измерять изменение концентрации соли в воде. В одном из экспериментов по окрашиванию в колодец были запущены кусочки пенопласта, в надежде, что мы его увидим в выходе воды на языке ледника, но этого не произошло. Каково же было наше удивление, когда, спустившись в ледниковый колодец осенью, на каскаде на глубине около 40 м от поверхности ледника мы увидели отметку краской уровня стояния воды (озера), вдоль которой были приморожены все кусочки пенопласта. Это говорило о том, что колодцы летом частично заполнены водой. Но по мере проработки каналов в течение летнего времени уровень воды в колодцах и отходящих от их дна галерей понижается. В 2022 году спуск в колодец в средней части ледника привел в низкую галерею на глубине 60 м. Ширина галереи была 3–4 м, а высота не превышала 0,8–1,0 м. Этот ход через 70 м от дна колодца заканчивался сифоном.

Группа колодцев у левого борта ледника глубиной не превышала 60 м. Здесь же находился колодец, который удалось посетить еще в 2001 году. Он был мертвый, поэтому в него не шла вода и можно совершить спуск летом. Глубина колодца была 45 м, но тогда в наличии имела только одна веревка длиной 40 м, и достичь дна не удалось. Галереи на дне этих колодцев отличались тем, что они были почти горизонтальными и на один метр от пола были заполнены стоячей водой. При этом ширина хода достигала 4 м, а высота над водой 2–2,5 м. Далее канал сужался и понижался, становился непроходимым.

На дне колодцев были проведены измерения скорости смыкания стен каналов, отходящих от дна колодцев. Поскольку колодцы на Альдегонде пробивали толщу холодного льда, в основании колодцев и галереях лед был теплее, чем в верхних частях колодца. В противоположные стены канала забуривались деревянные или металлические вешки, между концами которых при каждом посещении измерялось расстояние. Если верхняя часть колодцев оставалась практически неизменной в течение нескольких лет, то внизу каналы смыкались со скоростями до 1–2 м в год. Поэтому в колодцах, потерявших питание, галереи схлопывались за один-два года.

По возможности прохождение и изучение колодцев на леднике Альдегонда в будущем будет продолжено. Это будет полезно не только для понимания динамики внутреннего дренажа ледника, но и поможет геофизикам в интерпретации полученных результатов при проведении радио-эхозондирования на ледниках.

*Б.Р. Мавлюдов (Институт географии РАН).
Фото автора*

Выход из колодца

