

## СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324.87

DOI: 10.15372/KZ20230304

## ЛЕДНИКОВЫЕ КОЛОДЦЫ, ФОРМИРОВАНИЕ И ЗНАЧЕНИЕ

Б.Р. Мавлюдов\*

*Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия**\*Автор для контакта, bulatrm@bk.ru*

На основе собственных данных и литературных источников автором рассмотрены причины и условия формирования и изменения ледниковых колодцев. Ледниковые колодцы могут формироваться выше уровня воды в ледниковых трещинах в толще льда и не могут образовываться ниже уровня воды. Цилиндрическая форма ледниковых колодцев связана с разбрызгиванием водных струй на некоторой глубине от поверхности ледника. Рассмотрены вопросы, связанные с разными механизмами образования колодцев, их глубиной, возрастом, колебаниями уровня воды. Показана возможная связь ледниковых колодцев с внутренней дренажной системой ледников. Изучена связь колодцев с надвигами в толще льда, поскольку имеются ледники, у которых вода через колодцы до ложа не проникает.

**Ключевые слова:** *внутренний дренаж ледников, ледниковые колодцы, плоскости скольжения внутри льда.*

**Ссылка для цитирования:** Мавлюдов Б.Р. Ледниковые колодцы, формирование и значение // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 3, с. 40–57. DOI: 10.15372/KZ20230304.

## MOULINS: FORMATION AND SIGNIFICANCE

B.R. Mavlyudov\*

*Institute of Geography, Russian Academy of Science, Staromonetnyj Per. 29, Moscow, 119017 Russia**\*Corresponding author, bulatrm@bk.ru*

The reasons and conditions for the formation and change of moulins are considered on the base of author's own data and on published data. Moulins can form above the water level in crevasses in the ice column and cannot form below the water level. The cylindrical shape of moulins is associated with the spraying of water jets at a certain depth from glacier surface. Questions related to different mechanisms of moulin formation, their depth, age, water level fluctuations are considered. A possible connection between moulins and the internal drainage system of glaciers is shown. Since there are glaciers in which water does not penetrate to the bed through moulins, the question of the connection between moulins and thrusts in the ice thickness is being considered.

**Keywords:** *internal drainage of glaciers, moulins, slip planes inside ice.*

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время появилось много исследований, так или иначе связанных с ледниковыми колодцами. Рост количества публикаций вызван расширением зоны абляции на краю Гренландского ледникового щита, где весь поверхностный сток талых вод в верхней части зоны абляции происходит через ледниковые колодцы [McGrath et al., 2011; Hoffman et al., 2018; Andrews et al., 2021]. Поскольку от стока воды через ледниковые колодцы в Гренландии зависит вся гидрологическая структура ледникового щита, которая влияет на движение льда и вклад в изменение уровня Мирового океана, в настоящее время к колодцам приковано пристальное внимание.

Ледниковые колодцы – вертикальные цилиндрические отверстия диаметром 1–2 м и более

на языке ледника, образованные в трещине путем разрушения льда текущими тальми водами и сохраняющиеся после смыкания трещины в процессе движения ледника [Гляциологический словарь..., 1984].

Ледниковые колодцы были известны давно, и еще в начале XIX в. на них обратили внимание известные естествоиспытатели: Дж. Форбс [Forbes, 1845], Л. Агассиц [Agassiz, 1840] и Е. Десор [Désor, 1844], которые многократно посещали ледники Альп [Мавлюдов, 2006]. Спускались ли первые исследователи ледников в ледниковые колодцы или нет, доподлинно не известно.

Именно в XIX в. возникло представление о том, что колодцы доходят до ложа ледников. Связано это было с тем, что на месте отступающих

языков ледников находили эвразийские ванны (исполиновые котлы) [Гляциологический словарь..., 1984], подобные тем, что образуются в основании водопадов. Было понятно, что при наличии трещины и тонкого льда ледника вода с поверхности ледника водопадом обрушивается в колодец и достигает ложа ледника, формируя под ним эвразийский котел [Gilbert, 1906]. Считалось, что все колодцы доходят до ложа ледника. В XIX в. одним из методов, с помощью которого пытались доказать, что вода в колодцах достигает ложа ледника, было опускание на дно колодца молотка, привязанного к веревке, с прикрепленным к нему куском сала [Forbes, 1845]. По мнению исследователей, к салу на дне колодца должны были прилипнуть частицы подледного грунта, что стало бы доказательством проникновения колодца сквозь ледник до ложа. Поскольку к салу частицы грунта не прилипали, вопрос достижения колодцем ложа ледника оставался открытым. Одной из возможных причин такого устоявшегося представления были находки очень глубоких колодцев на ледниках. Но реальных доказательств того, что все колодцы достигают дна ледников, тогда найдено не было. Не найдено этих доказательств и до сих пор.

В настоящее время исследование колодцев на ледниках происходит в основном косвенными методами: изучение стока в них [McGrath et al., 2011], проведение георадарных [Stuart et al., 2003; Catania et al., 2008] и сейсмических исследований [Podolskiy, Walter, 2016; Röögli et al., 2016], измерение уровней воды в колодцах [Iken, 1972; Badino, Piccini, 2002]. В редких случаях используются прямые спелеологические методы изучения ледниковых колодцев [Schroeder, 1998; Moreau, 2002; Gullely et al., 2009a,b; Covington et al., 2020]. Многие исследователи уверены, что ледниковые колодцы проникают до ложа ледников вне зависимости от толщины льда, однако до сих пор так и не сложилось устоявшегося мнения о механизме формирования ледниковых колодцев. Например, в работе [Das et al., 2008] утверждается, что колодцы формируются при дренаже наледных озер по трещинам гидроразрыва. Представление это появилось потому, что на дне осушившегося озера в Гренландии был найден ледниковый колодец. В работе [Hoffman et al., 2018] утверждается, что дренаж наледных озер и пересечение поверхностных потоков трещинами является широко распространенным механизмом формирования ледниковых колодцев. Группа авторов [Andrews et al., 2021] полагают, что колодцы могут образоваться также врезанием в лед поверхностных каналов. В работе [Cuffey, Paterson, 2010, p. 179] сообщается, что колодцы формируются там, где потоки пересекают трещины, и по трещинам на дне озер. Многие пещерные каналы и колодцы связываются с трещинами гидроразрыва [Gullely et al., 2009a]. Однако

это совершенно разные механизмы возможного образования колодцев, которые обычно не разъясняются. Возможно, не все исследователи воочию видели ледниковые колодцы, а наблюдали их на аэрофотоснимках, фотоснимках или видео.

Цель настоящей работы – выявление закономерностей формирования и развития ледниковых колодцев. Рассмотрены также вопросы: чем ледниковые колодцы отличаются от трещин, как они связаны с системой внутреннего дренажа ледников и какую роль они выполняют в жизни ледников.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

С 1982 г. автор проводит прямые исследования пещер на ледниках, используя спелеологические методы проникновения в них. За это время исследования проводились в Гималаях, на Южном Тибете, Тянь-Шане, Кавказе, Шпицбергене, в Андах и Антарктике. Ледниковые колодцы исследовались автором на Кавказе, Тянь-Шане, Шпицбергене и в Антарктике. Проникновение в колодцы осуществлялось на теплых, политермических и холодных ледниках. Имея большой опыт исследования ледниковых пещер и колодцев, автор построил свою теорию формирования внутреннего дренажа ледников [Мавлюдов, 2006; Мавлюдов, 2007, 2014], в развитие которой с использованием литературных данных по этому вопросу предлагается настоящая работа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Формирование ледниковых колодцев

Хорошо известно, что ледниковые колодцы формируются по трещинам [Forbes, 1845; Stenborg, 1973]. То есть для формирования колодца необходимо выполнение двух условий: наличие трещины во льду и стекающей в нее воды в виде концентрированного водного потока. Как правило, речь идет о вертикальных трещинах скола или растяжения, расположенных поперек ледника и(или) под углом к его краю. Часто на ледниках можно видеть, как неожиданно водный поток, текущий по поверхности ледника, пересекается вновь образованной трещиной, которая сначала частично перехватывает, а потом и полностью поглощает воду этого потока. Дальше возможны два варианта:

1. Если вода из нижней части трещины не имеет оттока, то она полностью заполнит трещину и потечет дальше в прежнем русле по поверхности ледника. Это явление неоднократно наблюдалось на многих ледниках. Так эта трещина, заполненная водой, и будет существовать, пока не будет сжата при движении ледника или не превратится в лед при замерзании воды. Никакого ледникового колодца при этом не образуется, хотя оба условия были выполнены (рис. 1, а).

2. Если вода имеет отток в нижней части трещины в толщу льда, то при превышении оттока воды над притоком трещина не заполняется водой, а остается заполненной воздухом (см. рис. 1, б). Только в этом случае по трещине начинает формироваться ледниковый колодец [Stenborg, 1973].

Если отток воды из трещины будет меньше притока воды в нее, то тоже возможны два варианта:

1. Малый отток воды из нижней части трещины приведет к заполнению ее водой и частичному переливу воды из трещины. Но из-за неполного оттока воды в нижней части трещины из нее будет вытекать меньше, чем втекло. По мере разработки и расширения канала, дренирующего трещину

снизу, разность количества втекающей и вытекающей воды из трещины сверху будет изменяться до тех пор, пока вода, втекающая в трещину, не перестанет переливаться через нее. После этого положение уровня воды в трещине начнет понижаться до тех пор, пока трещина полностью не освободится от стоячей воды, и вся обрушивающаяся в трещину вода будет уходить в нижние дренажные каналы. Именно тогда начнется формирование ледникового колодца (см. рис. 1, в).

2. Вода из трещины не имеет оттока, но под давлением столба воды трещина начинает углубляться в лед, т. е. становится трещиной гидроразрыва (см. рис. 1, г). Возможность формирования таких трещин в ледниках находится пока в рамках гипотезы и, несмотря на обилие публикаций [Van

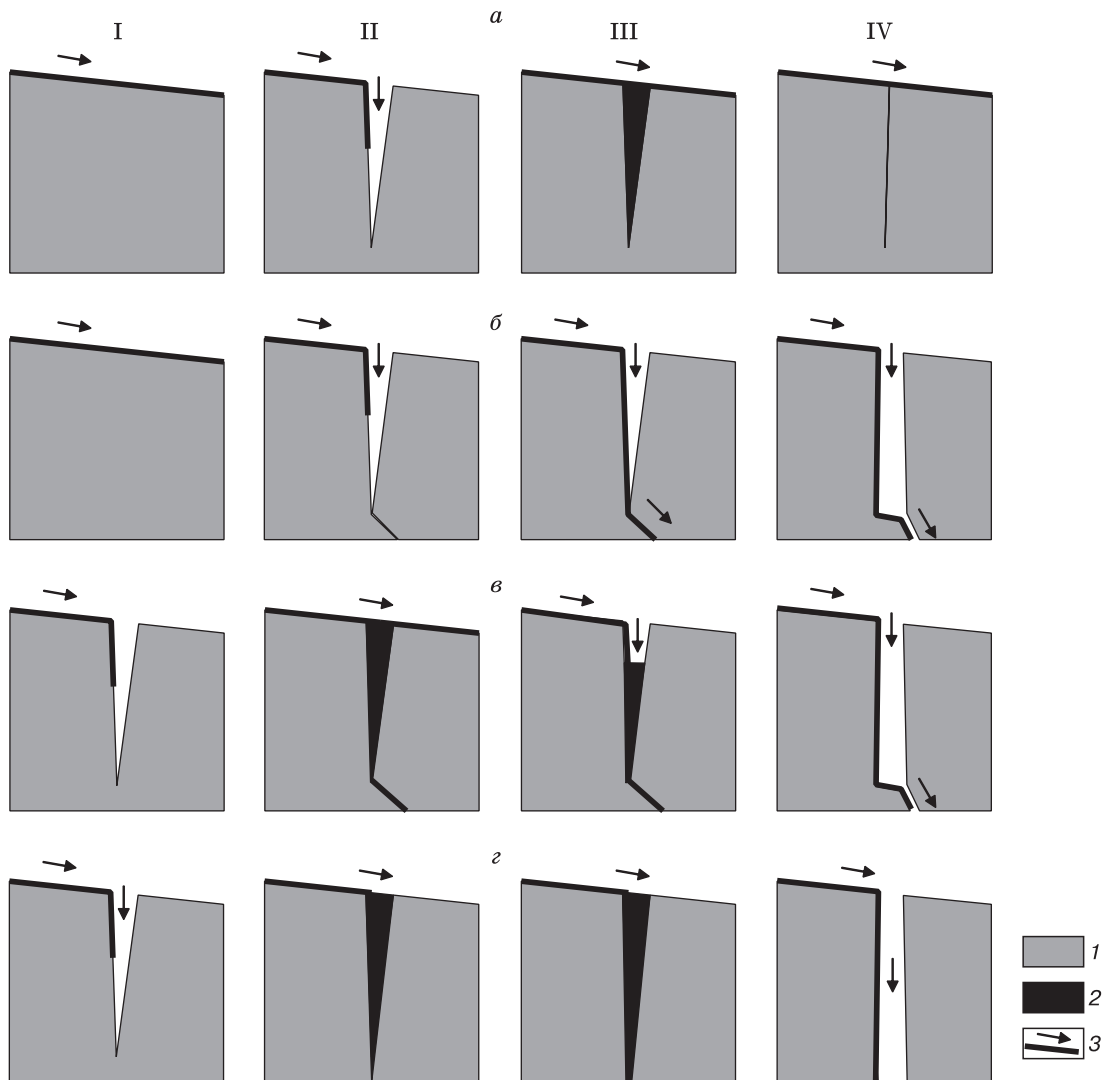


Рис. 1. Схема попадания воды в трещину, возникающую на пути водного потока, заполнения ее водой и течения дальше (а), формирования ледникового колодца (б, в) и предположительного образования колодца по гидротрещине (г).

1 – лед, 2 – вода, 3 – направление течения водного потока. I–IV – последовательность изменений.

*der Veen, 2007; Das et al., 2008*], бесспорных доказательств не имеет. Препградой формированию таких трещин в ледниках могут быть напряженное состояние льда из-за движения ледника и низкие температуры льда. Иными словами, для формирования таких трещин благоприятны неподвижные теплые ледники, т. е. “мертвый” лед, в котором трещины практически не формируются. Это означает, что возможность формирования трещин гидроразрыва на ледниках находится под большим вопросом, так же как и колодцев по ним.

Предположим, что трещина гидроразрыва сформируется из обычной поперечной трещины на леднике, в которую втекает водный поток. Чтобы трещина превратилась в трещину гидроразрыва, для ее углубления в каждый отдельный момент потребуются все большее количество воды по сравнению с предыдущим моментом [*Weertman, 1973*]. Это означает, что может наступить момент, когда воды для углубления трещины потребуется больше имеющегося количества воды в водном потоке, который в нее втекает, ведь при углублении трещины неизбежно ее объем должен увеличиваться.

Если воды будет недостаточно для заполнения трещины, то ее уровень в ней начнет падать и углубление трещины затормозится. Низкие температуры льда приведут к замерзанию не только нижнего окончания трещины, но и всей нижней части трещины, и процесс углубления трещины прекратится. Он не возобновится и после заполнения трещины водой, а поток по-прежнему будет просто течь над заполненной водой трещиной. Это означает, что если формирование трещин гидроразрыва возможно, то оно будет происходить только при наличии наледных озер с достаточным количеством воды, как это регулярно происходит в Гренландии [*Das et al., 2008*]. При этом сброс воды из озера в трещину должен осуществляться в бассейне озера, а не переливом, иначе этот случай ничем не отличается от втекания в трещину водного потока.

Дренирование воды озера через вертикальную трещину возможно только в том случае, когда вода из трещины имеет или находит выход во внутреннюю дренажную систему ледника. В данном случае способ дренажа внизу трещины не важен. До момента прорыва воды из озера на поверхности ледника оно заполнялось водой. Прорыв воды из озера происходит быстро (за часы [*Das et al., 2008*]), вероятно, в момент формирования трещины (независимо от причин ее образования). В этом случае вода из озера устремляется вниз по всему сечению трещины. Это означает отсутствие обособленной струи, которая только и может сформировать цилиндрический колодец. При сбросе воды через трещину происходит расширение сечения трещины водным потоком во всех направлениях и возникает расширенная зияющая

трещина. Никакого округлого колодца в этом случае сформироваться не может. Поэтому вызывают сомнения сообщения исследователей о том, что округлые колодцы могут формироваться при сбросе воды из озер на поверхности ледников [*Das et al., 2008; Benn, Evance, 2010; Cuffey, Paterson, 2010*].

### Механизм формирования ледниковых колодцев

К сожалению, механизм формирования ледниковых колодцев рассмотрен только в единичных работах [*Мавлюдов, 2006; Badino, 1992; Мавлюдов, 2007*]. Выяснено, что колодцы могут сформироваться только по тем трещинам, которые не заполнены водой.

Если на пути водного потока образовалась открытая трещина, которая дренируется в нижней части, в этом случае вода в нее обрушивается в виде водопада. При этом водопад располагается только в месте впадения воды в трещину, и именно на этом небольшом участке зияющей трещины возникает колодец. Если в трещину впадает несколько потоков, то в месте впадения каждого из них возникает обособленный колодец. Как правило, вновь возникшие трещины не бывают широко открытыми (обычная ширина 10–15 см), поэтому водный поток при падении в трещину ударяется в ее дальнюю от потока сторону, от которого отражается в ближнюю часть трещины. Отражение от стен трещины будет продолжаться до тех пор, пока поток не примет вертикальное положение. Поскольку начальная температура потока, падающего в трещину, немного выше нулевой [*Isenko et al., 2005*], за счет термоэрозии в месте удара потока в стену трещины возникает углубление, которое способствует еще большему отражению потока в противоположную стену. Так как не все тепло в месте удара потока в стену трещины полностью реализуется на таяние льда, то часть тепла с водой попадает на противоположную стену, а значит, и там начинается формироваться углубление во льду. Это также способствует усилению отражения потока воды к противоположной стене. Поскольку по мере падения струи вода нагревается за счет перехода потенциальной энергии потока в кинетическую, таяние на стенах трещины в местах попадания отраженной струи продолжается и в глубине трещины. Таким образом, в противоположных стенах трещины формируются системы выемок, которые постепенно, по мере таяния льда, под действием струи воды начинают передвигаться вниз по трещине. Это приводит к расширению участка трещины в месте падения струи. Теперь даже если трещина сомкнется при перемещении ледника из зоны растяжения в зону сжатия, то зародившийся колодец сохранится и продолжит принимать воду.



Расширение колодца будет происходить до тех пор, пока оно не достигнет нижнего конца трещины. Дальше колодцу будет уже некуда углубляться, и здесь поток потечет вдоль системы трещин, формируя полости, которые были описаны в работе [Fountain, Walder, 1998].

Но такой механизм формирования колодца не может транслироваться бесконечно в глубину. Если растущий колодец имеет глубину 20–30 м, то падающая в него вода сохраняется в виде струи, которая будет ударять в стену колодца, противоположную месту втекания воды. В месте соприкосновения струи со льдом происходит таяние льда и расширение колодца. Поэтому часто колодцы расширяются вниз. После того как колодец расширится, струя в колодце будет падать свободно, тогда тепло, выделившееся в воде при переходе потенциальной энергии в кинетическую, будет использовано на таяние льда в основании колодца. В месте удара струи в пол на дне формирующегося колодца возникнет водобойная яма. Глубина водобойной ямы будет зависеть от расхода водного потока. Чем больше расход потока, тем глубже может быть водобойная яма. Например, на леднике Южный Иньльчек (Кыргызстан) в 1991 г. на дне колодца глубиной около 30 м при расходе потока  $1.5 \text{ м}^3/\text{с}$  автор наблюдал водобойную яму глубиной около 2 м.

#### Разбрызгивание воды в колодцах

Если глубина трещины и, соответственно, глубина возникающего колодца превысят некоторую величину, то в действие вступает сопротивление воздуха, в результате чего поток воды при падении разбивается на отдельные части и капли. Это не относится к первичному этапу формирования колодца с отражением струи воды от стен, так как в этом случае падающая струя успевает пройти небольшое расстояние от одной стены до другой. Этот механизм начинает работать тогда, когда вода в колодце начинает падать свободно, не касаясь стен. Поскольку каждая капля или сгусток воды имеет температуру выше точки замерзания и разлетается во всех направлениях, в том числе и к стенам колодца, стены колодца начинают почти равномерно таять во всех направлениях, из-за чего колодец приобретает форму, близкую к цилиндрической. То есть именно благодаря разбрызгиванию потока воды в воздушной среде возникает цилиндрическая форма ледникового колодца. В вертикальной трещине на дне озера, заполненной водой, такая цилиндрическая форма образоваться не может, поскольку даже если в ней возникнет поток воды, образуется узкий канал щелевой формы.

В работе [Holmlund, 1988, p. 245] сообщается, что разбрызгивание водного потока происходит в ледниковых колодцах на глубине 15–20 м от поверхности. В работе [Badino, 1992] говорится о глубине разбрызгивания, равной 25 м от поверх-

ности. Можно предположить, что интенсивность разбрызгивания воды в ледниковых колодцах будет зависеть от расхода водного потока. Вероятно, чем больше будет водный поток, тем на большей глубине от поверхности он будет разбрызгиваться. К сожалению, до настоящего времени определить глубину, на которой произойдет разбрызгивание водного потока в зависимости от его расхода, не представляется возможным, так как этот вопрос еще не решен даже на теоретическом уровне.

Струя воды, падающая в атмосфере, в гидравлике называется незатопленной струей [Ширяева, Григорьев, 2011; Триандафилов, Ефимова, 2012]. Такая струя, вытекающая в атмосферу, может быть структурно разделена по длине на три участка: компактный, раздробленный и распыленный. В компактной части струи обеспечивается сплошность потока, струя имеет форму, близкую к цилиндрической. В раздробленном участке струи обнаруживается нарушение сплошности потока, струя разрывается на крупные части, ее поперечное сечение увеличивается, и она расширяется по отношению к компактной части. Распыленная часть струи состоит из множества отдельных капель, в которые превращается весь поток. Ее поперечное сечение еще больше, чем у раздробленного участка струи.

При движении струи в атмосфере на нее действуют сила тяжести, силы сопротивления воздушной среды и внутренние силы, вызываемые турбулентным движением жидкости. В момент дробления струи на мелкие капли начинают проявляться силы поверхностного натяжения воды [Триандафилов, Ефимова, 2012].

Механика разрушения свободно падающих ламинарных и турбулентных струй разработана только для таковых с очень маленьким диаметром, не превышающим первых сантиметров [Ervine, Falvey, 1987; Eggers, Villermaux, 2008; Massalha, Digilov, 2013]. Для таких струй определено соотношение длины компактного участка струи и начального диаметра струи, которое находится в интервале 50–100. Однако из-за различных масштабов и условий явления это не позволяет напрямую перейти к водным струям большого диаметра, которые обрушиваются в ледниковые колодцы. Но поскольку других данных по этому вопросу не имеется, попробуем использовать для водопадов в ледниковых колодцах результаты, полученные для малых струй воды. В работе [Фетисов, 1995] приведена формула для расчета соотношения длины компактного участка струи и начального диаметра струи, выведенного для падающей без ускорения малой турбулентной струи в виде:

$$L/d = 0.94\text{Re}^{0.25}\text{We}^{0.3},$$

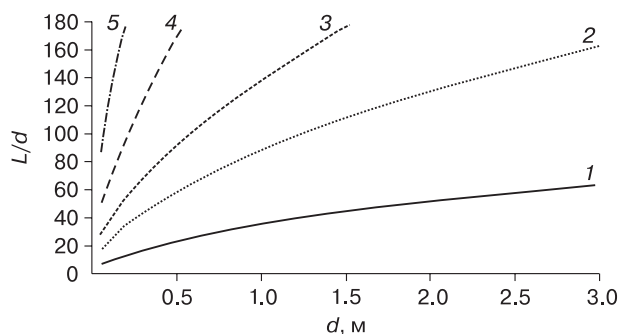
где  $L$  – длина компактной струи, м;  $d$  – диаметр струи, м;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса ( $\text{Re} = Ud/\nu$ );

$We$  – число Вебера ( $We = \rho U^2 d / \sigma$ );  $U$  – начальная скорость потока, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – сила поверхностного натяжения воды, Н/м.

Если использовать эту формулу для крупных потоков, падающих в ледниковые колодцы, то при увеличении начальной скорости потока  $U$  и диаметра потока  $d$  соотношение длины компактного участка струи и начального диаметра струи ( $L/d$ ) быстро растет (рис. 2). Это свидетельствует о том, что падающие струи воды большего диаметра должны находиться в компактном состоянии на большем протяжении.

При этом наибольшее разбрызгивание струи, падающей в колодец, происходит при малых скоростях движения водного потока и меньшем диаметре (а значит, и расходе) водной струи. Небольшие потоки при малой скорости течения, что обычно для выровненных поверхностей ледников, разбиваются на брызги на глубинах до 20 м, что близко к натурным наблюдениям [Holmlund, 1988; Badino, Piccini, 2002]. А для больших потоков глубина разбрызгивания водной струи, вероятно, увеличивается. Насколько это соответствует действительности неизвестно, особенно потому, что использованы данные для неускоряющейся при падении малой струи [Фетисов, 1995]. В действительности, любая падающая струя в пределах своего компактного участка обязательно ускоряется при падении, с чем также связаны утончение струи и начало ее разрушения. Кроме того, все эксперименты с падающей струей были проведены в условиях неограниченного пространства, в то время как в пределах ледниковых колодцев оно имеет ограничение и конечный объем. При этом воздух внутри колодцев постоянно поступает, увлекаемый падающей струей воды из-за эжекторного эффекта. Некоторое подобие падению струи в неограниченном пространстве наблюдается в раскрытой трещине (до ее смыкания) в начальный момент формирования колодца. В этом случае воздух, засасываемый водным потоком в месте падения его в трещину, может спокойно выходить из трещины вне зоны действия водного потока, в стороне от него. После смыкания трещины воздух из нее может выходить только тем же путем, каким приходит вода в колодец. Это способствует разрыву и разрушению водных струй, обрушивающихся в колодец, на более коротком расстоянии, чем предсказывает теория для мелких струй в открытой атмосфере, и, вероятно, на более коротком расстоянии, чем на водопадах вне ледников. Чтобы правильно оценивать глубину разрушения водной струи в ледниковых колодцах, требуются дополнительные исследования.

Схема формирования колодца по трещине приведена на рис. 3.

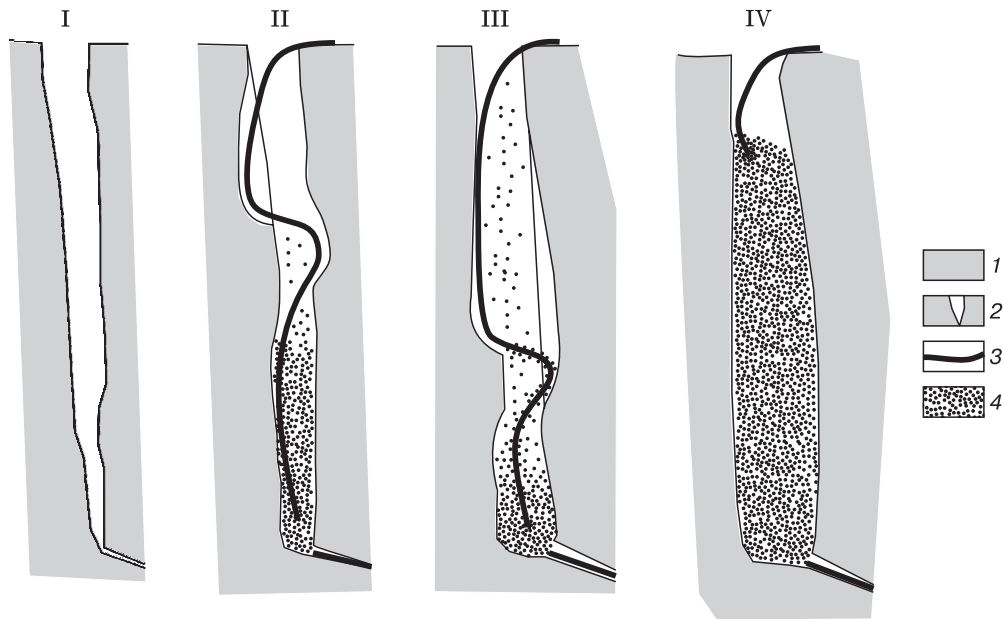


**Рис. 2. Зависимость соотношения длины компактного участка струи и начального диаметра струи ( $L/d$ ) при разных диаметре струи ( $d$ ) и скорости водного потока ( $U$ ) [Фетисов, 1995]:**

1 -  $U = 0.1$  м/с; 2 -  $U = 0.3$  м/с; 3 -  $U = 0.5$  м/с; 4 -  $U = 1$  м/с; 5 -  $U = 2$  м/с.

Обратимся опять к предположению, что колодцы, доходящие до дна ледникового щита Гренландии, могли сформироваться при дренаже наледных озер [Das et al., 2008]. Для образования такого колодца необходимо, чтобы он во время дренажа озера был осушен до самого ложа. В действительности этого не происходило. Поэтому такой колодец, вероятно, сформировался еще до заполнения водой озерной чаши, потом перестал функционировать, а во время прорыва озера был просто подновлен. Но это не означает, что колодец ранее и впоследствии достигал ложа ледника. Кроме того, в большинстве ледников был отмечен уровень воды, расположенный в средней или верхней части ледниковой толщи [Benn, Evans, 2010; Cuffey, Paterson, 2010]. Это исключает возможность формирования ледниковых колодцев ниже уровня водного горизонта. Нет ответа на вопрос, как трещина гидроразрыва может прорвать лед, находящийся в напряженном состоянии и имеющий большую толщину, если температура его составляет  $-20...-30$  °С, как это отмечается в Гренландии [Cuffey, Paterson, 2010]. Модельные расчеты автора показывают, что открытая трещина во льду шириной 10 см, по которой течет вода, может существовать, не перекрываясь вновь образовавшимся льдом, если температура льда не ниже  $-8$  °С [Мавлюдов, 1998]. К аналогичным выводам пришел также П.А. Шумский [1955], который сообщил, что в ледниковом льду с температурой ниже  $-8$  °С свободной воды нет. Это свидетельствует о высокой вероятности быстрого перемерзания вновь возникающих небольших трещин в их узкой части.

Поскольку падающая вода в глубоких колодцах разбрызгивается, равномерно падающие на дно колодца капли не формируют водобойную яму. Дно колодца становится плоским или слабо



**Рис. 3. Схема формирования ледникового колодца по раскрытой трещине (I), вид сбоку.**

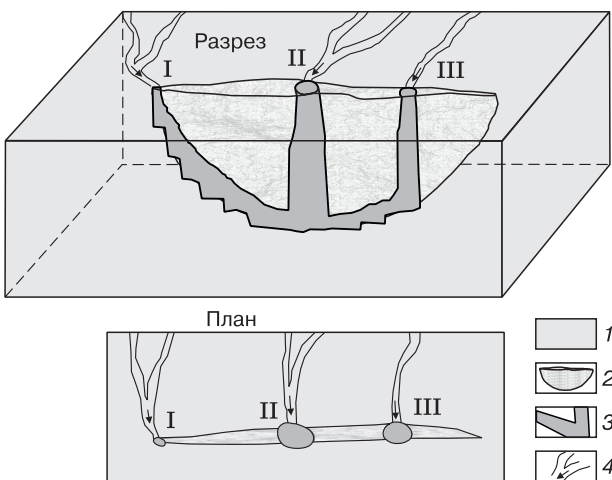
II–IV – этапы развития колодца; 1 – лед, 2 – трещина, 3 – поток воды, 4 – разбрызгиваемая вода. Отток воды из трещины снизу показан условно.

наклонным в сторону продолжения канала, начинающегося на дне колодца. Автор неоднократно наблюдал это на дне ледниковых колодцев на Шпицбергене, если их глубина превышала 30–40 м, а расход потока в летнее время мог достигать

0,5–1,5 м<sup>3</sup>/с. Аналогичная картина наблюдалась в колодцах на ледниках Кавказа и Тянь-Шаня.

#### Глубина ледниковых колодцев

Глубина первого колодца в возникающей полости равна глубине первичной ледниковой трещины, если поток попадает в центр трещины [Мавлюдов, 2006]. По современным представлениям, любая обособленная трещина, не выходящая на поверхность и находящаяся внутри любой породы (в том числе и во льду), представляет собой плоский диск круглой формы с небольшим расширением в центре [Tsang, Neretnieks, 1998]. Вертикальная трещина на леднике представляется в виде части этого диска, заглубленного в лед. Поскольку фактически на поверхности ледников мы видим только половинку таких дискообразных трещин, наибольшая глубина ледниковой трещины находится примерно в районе ее середины, а к краям глубина трещины уменьшается до нуля. Поэтому если поток попадает в трещину примерно в ее середине, то глубина первичного колодца будет максимальной, а если ближе к краю трещины, то глубина колодца будет меньше (рис. 4) [Мавлюдов, 2006].



**Рис. 4. Блок-диаграмма формирования ледниковых колодцев в зависимости от места впадения водотока в трещину.**

I – каскад мелких колодцев, возникших вдоль края трещины; II – сплошной колодец в центральной части трещины; III – колодец с небольшим каскадом; 1 – блок ледникового льда, 2 – полость трещины, 3 – ледниковый канал, возникший по трещине, 4 – поверхностные водотоки и направление течения воды. Отток воды из трещины снизу не показан.

Если поток попадает на край трещины, то падение воды в лед будет происходить по наклону, что приведет к формированию каскада (последовательной серии) небольших колодцев, причем при приближении к центру трещины глубина этих колодцев в каскаде будет уменьшаться. Похожая структура полости может возникнуть, если

поток поглощается наклонной трещиной, падение которой направлено по течению потока. В этом случае глубина небольших колодцев каскада будет примерно одинаковой. Чем круче будет трещина, тем большая глубина будет у каждого колодца каскада.

Чаще всего колодцы на горных ледниках и ледниковых щитах формируются на небольших водных потоках, расход которых в любом случае не позволяет формироваться трещинам гидроразрыва (независимо от того, существуют они или нет). А поскольку глубина трещин на ледниках не является бесконечной, глубина колодцев также имеет ограничения. Например, для теплого льда глубина обычных поперечных ледниковых трещин не превышает 25–30 м [Cuffey, Paterson, 2010]. Но, видимо, бывают исключения, поскольку, например, на леднике Мер-де-Глас (Mer de Glace) во Франции глубина колодцев может достигать 80 м [Reynaud, 1987] или даже 105 м [Forbes, 1845]. Для холодных и политермических ледников глубина типичных трещин больше, так как трещины возникают в более жестком холодном льду. Вероятно, глубина трещин в этом случае редко превышает 100 м [Голубев, 1976], хотя в некоторых случаях может достигать 150 м [Schroeder, 1998]. Возможно, на плавающих краях выводных и шельфовых ледников в Антарктиде трещины могут иметь большую глубину. Если это так, то вызывает сомнения возможность существования колодцев на ледниковом щите Гренландии вне пределов выводных ледников глубиной 400 и 600 м [Andrews et al., 2014], в то время как спелеологическими методами не удалось выявить здесь колодцы глубиной более 173 м [Reynaud, Moreau, 1995], а по другим данным – более 203 м [Gulley et al., 2009a]. Вероятно, эта глубина известных колодцев примерно соответствует глубине трещин, по которым они сформировались. К тому же, глубина колодца 400 или 600 м должна означать, что до этой глубины должны осушаться трещины, по которым формируются эти колодцы, что не подтверждается наблюдениями за уровнем воды в колодцах.

Исследования автора на Шпицбергене показали, что глубина колодцев на политермических ледниках примерно равна толщине слоя холодного льда и обычно не превышает 75–80 м (например, на леднике Альдегонда, Земля Норденшельда, Западный Шпицберген) [Mavlyudov, Solovyaynova, 2003]. Со дна колодцев здесь обычно отходит слабонаклонная внутриледная галерея, которая в отдельных случаях перемежается небольшими колодцами глубиной от 0.5 до 8 м. В некоторых случаях на дне субгоризонтальной части полости на льду стоит вода. В холодных ледниках колодцы могут достигать ложа ледника, как это наблюдалось на леднике Тавле (Земля Норденшельда, Западный Шпицберген), где один из исследованных

колодцев достигал глубины 100 м. При этом другой колодец имел глубину около 80 м, но далее поток каскадом в длинной внутриледной галерее спускался до ложа ледника примерно на глубине 100 м. О том, что донная морена была проморожена, свидетельствовало наличие солифлюкционного потока на участке пересечения каналом границы лед–морена. Оттаивание подледного грунта происходило из-за отепления его водой, протекавшей ранее в ледниковом канале. Колодцы до ложа отмечались на этом леднике и в северной части языка ледника при толщине льда около 15 м [Mavlyudov, 2007]. На леднике Южный Иныльчек (Кыргызстан) все обследованные в разные годы ледниковые колодцы заканчивались на глубине 80–100 м заполненными водой каналами [Mavlyudov, 2022].

#### Другие механизмы формирования ледниковых колодцев

Автором был найден еще один механизм формирования ледниковых колодцев, причем он был обнаружен в ледниках, где отсутствуют трещины [Mavlyudov, 2015]. Первично на таких ледниках формировались глубокие ледяные каньоны при продолжительном врезании в лед поверхностных водотоков. Поскольку обычно глубина таких каньонов не превышает 15 м (реже до 30 м), при достижении этой глубины каньоны частично или полностью отмирают обычно из-за того, что вода находит другой путь движения по поверхности ледника. Покинутые или просто углубившиеся каньоны замыкаются пластической деформацией льда, заполняются сверху снегом, наледным и наложенным льдом, превращаясь во внутриледные каналы [Mavlyudov, 2006; Vatne, 2001; Gulley et al., 2009b]. Если какой-либо поверхностный водный поток, стекая по поверхности ледника, пересечет в какой-то части запечатанный каньон, то его вода может проникнуть в каньон, сформирует сначала небольшой канал в перекрывающей каньон снежно-ледяной пробке, который со временем превратится в полноценный ледниковый колодец. В этом случае роль трещины в формировании колодца сыграет пустота ледяного каньона. Но всегда максимальная глубина такого колодца будет ограничена глубиной ледяного каньона. Автор наблюдал такие колодцы на многих холодных ледниках Шпицбергена и на теплых ледниках в Антарктике.

В литературе [Myreng, 2015; Vatne, Irvine-Fynn, 2015] имеются сведения о том, что во внутриледном канале ледника Брэггер на Шпицбергене ледниковый колодец возник при попятной эрозии водного потока на наклонном каскаде мелких колодцев (рис. 5). Скорее всего, это ошибка, так как на каскаде мелких колодцев попятная эрозия воздействует на все вертикальные стенки мелких колодцев, из которых состоит каскад, в одинако-





**Рис. 5. Продольные профили внутриледного канала ледника Брёггер разновременных топографических съемок.**

Вдоль оси абсцисс показано расстояние вдоль тальвега канала, а не расстояние по горизонтали [Vatne, Irvine-Fynn, 2015].

вой степени. Обосновывается это тем, что при падении воды тепло в падающем потоке из-за перехода потенциальной энергии в кинетическую распределяется равномерно по всему протяжению падающего потока. Это означает, что все мелкие колодцы при попятной эрозии будут смещаться в пространстве и во времени практически одинаково. А чтобы, согласно подобному механизму, из наклонного каскада образовался единый ледниковый колодец, необходимо, чтобы попятная эрозия на нижних колодцах каскада была гораздо выше, чем на верхних колодцах, т. е. попятная эрозия в этом случае должна возрастать сверху вниз. На это нет никаких естественных причин. Значит, это невозможно. Объяснить же формирование колодца на месте каскада можно появлением вертикальной трещины на месте первого колодца каскада. Для формирования нового колодца по такой трещине в начале каскада вполне достаточно одного сезона таяния, а в указанной работе промежутки между посещениями ледникового колодца составили по несколько лет. Именно поэтому, скорее всего, авторам и не удалось непосредственно проследить реальное превращение каскада в колодец.

На леднике Альдегонда на Шпицбергене в одном из исследованных ледниковых колодцев в средней части ледника с разницей в один год автор наблюдал такую картину. В первое посещение глубина входного колодца составляла 45 м, откуда начиналась субгоризонтальная вертикально ориентированная щелевая галерея. На следующий год глубина входного колодца составила около 60 м, внизу его начиналась новая субгоризонтально ориентированная вертикальная щелевая галерея. Новая галерея располагалась точно под старой галереей, так как обе образовались по одной вертикальной трещине. Углубление колодца в этом случае было связано с углублением трещины. Анало-

гичная ситуация могла произойти и на леднике Брёггер.

### Время жизни ледниковых колодцев

Ледниковые колодцы зарождаются, живут какое-то время и отмирают. Эволюция колодцев связана с изменением режима водного питания, которое происходит либо из-за движения ледника и формирования новой трещины выше по леднику от существующего ледникового колодца, либо с изменением структуры поверхностной дренажной сети ледника. Колодец, потерявший питание водным потоком, переходит на питание водой только из коры таяния, которая замерзает на стенках колодца за счет запаса холода внутри ледяной толщи, и постепенно начинает заполняться снегом и льдом. После кольматации льдом нижнего выхода из колодца он заполняется водой, которая также начинает замерзать на стены колодца. Такой колодец запечатывается льдом с поверхности и превращается в вертикальную замкнутую полость, заполненную водой. От стен колодца внутрь полости начинают расти внутриводные ледяные кристаллы, и постепенно полость заполняется льдом. Обнажившись на поверхности ледника, такой отмерший и полностью замерзший колодец сильно отличается по своей гигантокристаллической радиально-лучистой структуре от окружающего ледникового льда [Мавлюдов, 2006; Stenborg, 1973]. Предпринимались попытки восстановить структуру ледникового колодца фиксированием положения в пространстве таких срезов ледникового колодца через некоторые периоды времени [Holmlund, 1988]. Как правило, раскристаллизованные колодцы не могут возродиться, даже если они получают водное питание. То же самое относится и к частично раскристаллизованным колодцам, в ядре которых еще сохранилась полость с водой.

Нередко по сечению полностью раскристаллизованной полости можно выяснить, сколько времени потребовалось на полное замерзание колодца. Например, на Шпицбергене обычное время полного замерзания колодцев составляет от 1 до 6 лет. Но на леднике Тавле (Земля Норденшельда, Шпицберген) на одном из отмерших колодцев автору удалось насчитать 13 годовых слоев.

Как правило, в активном состоянии колодцы находятся несколько лет, после чего они отмирают, давая начало новым колодцам. В работе [Holmlund, 1988] говорится о возрасте колодцев в осевой части ледника Стор (Швеция) до 10 лет. В работе [Schroeder, 1998] по косвенным признакам определено, что колодцы в леднике Ханс (Шпицберген) могут быть активными до 20 лет и больше. Но даже если это и так, то это скорее исключение, чем правило. Отмершие колодцы также существуют несколько лет, пока они полностью не заполнятся снегом и льдом. Снег быстро запол-

няет отмершие колодцы, так как они являются ловушками метелевого переноса снега в зимнее время.

### Уровни воды в колодцах

Одним из методов исследования влияния колодцев на движение ледников является изучение динамики уровней воды в колодцах [Iken, 1972; Badino, Piccini, 2002]. Изучение колодцев (даже при полном отсутствии озер на поверхности ледников) показало, что увеличение уровня воды в них соответствует весеннему ускорению движения ледников [Iken, 1972]. Это означает, что уровни воды в колодцах как-то связаны с движением ледников. Типичным объяснением этого является предположение, что вода через колодцы попадает на ложе ледника, смачивает его, что и вызывает ускорение движения ледника. Связывают это с тем, что вода, приносящая к ложу через колодцы, создает давление в основании льда, достаточное, чтобы ледник как бы всплыл и начал двигаться быстрее. Действительно, по наблюдениям автора на Шпицбергене, в начале сезона абляции многие колодцы заполняются водой почти полностью, о чем говорят забереги и частицы фирна, прилипшего и примороженного к стенам колодцев на месте прежних уровней воды. Постепенно в течение летнего сезона уровень воды в активных колодцах падает и становится минимальным в конце летнего сезона, когда таяние на поверхности ледников прекращается.

Кроме того, в колодцах на леднике Гиндаль (Аргентина) были отмечены суточные колебания уровня воды [Badino, Piccini, 2002], что, вероятно, связано как с ограничениями пропускной способности для воды у каналов в основании ледниковых колодцев, так и с возможной систематической перестройкой самих внутренних дренажных каналов. В той же статье авторы доказывают, что внутренняя дренажная система ледника является внутриледной, расположенной вблизи местного уровня воды в леднике. При этом амплитуда суточных колебаний уровня воды в колодце Висекаро (Vicesaro) составляла около 90 м.

Суточные колебания уровней воды были измерены в ледниковых колодцах в западной части Гренландии [Andrews et al., 2014; Covington et al., 2020], где в колодце на высоте 765 м над ур. моря амплитуда колебаний уровня воды достигала 4 м, а на высоте 950 м над ур. моря составляла 20–30 м [Covington et al., 2020], в то время как на высоте 700 м над ур. моря колебания достигали 150 м [Andrews et al., 2014]. Интересно, что колебания уровней воды в колодцах, разделенных значительным расстоянием, происходят синхронно, но с разной амплитудой [Covington et al., 2020]. Это свидетельствует, скорее, не о прямой связи этих ледниковых колодцев, а о схожести внешних кли-

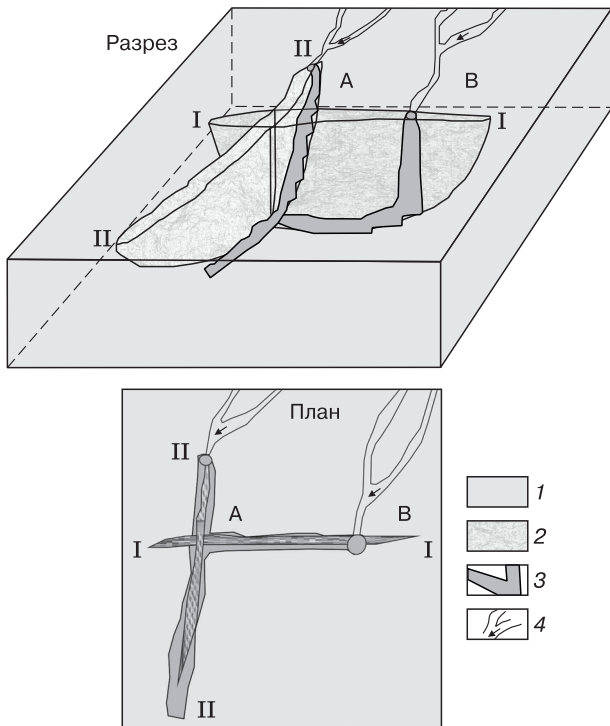
матических условий, ответственных за таяние льда и поступление талой воды в колодцы.

Для объяснения суточных колебаний уровней воды в колодцах Гренландского щита авторы работы [Trunz et al., 2022] провели моделирование колодцев. Если ранее в модельных расчетах принимали сечение колодцев цилиндрическим от поверхности до ложа, то в этом исследовании авторы использовали не только цилиндрическую форму ледниковых колодцев (но и расширяющуюся вверх, расширяющуюся вниз, кубкообразную, бутылкообразную, сначала расширяющуюся, потом сужающуюся и сначала сужающуюся, а потом расширяющуюся), также предполагали, что они доходят до ложа ледникового щита. Авторы считают, что накопление воды в толще ледника играет ключевую роль в связи с поступлением талой воды и движением ледника. Они предполагают, что изменение ледниковых колодцев происходит через сочетание таяния из-за турбулентного течения воды и вязких и упругих деформаций льда. Это означает, что авторы пишут в действительности не о ледниковых колодцах, путая их с системами внутреннего дренажа ледников, строение которых неизвестно, но совершенно точно отличается от строения ледниковых колодцев. Мы можем это утверждать, поскольку каналы внутри льда формируются во фреатических условиях, когда они постоянно заполнены водой, а ледниковые колодцы образуются при разбрызгивании водного потока при уровне воды ниже основания колодца. Авторы работы [Trunz et al., 2022] не могут объяснить форму колодцев, которые сужаются книзу, потому что они, вероятно, не вполне точно понимают механизм образования колодцев. Кроме того, как упоминалось выше, колодцы не могут иметь ту же или расширяющуюся форму ствола ниже уровня стояния воды, поскольку формируются только в зоне разбрызгивания водного потока, т. е. выше уровня воды, а значит, эти модели функционирования ледниковых колодцев [Covington et al., 2020; Trunz et al., 2022] не имеют под собой физического основания. То же самое относится и к моделям колодцев в работе [Andrews et al., 2021].

Несмотря на то что уровень воды в колодцах меняется в течение года, присутствие воды в них отепляет окружающий лед [Schroeder, 2007].

### Колодцы и дренажная система ледника

Разберемся, куда девается вода со дна трещины там, где формируется ледниковый колодец, если вода не достигает ложа ледника, как это отмечалось в некоторых случаях? Один из возможных вариантов ответа: перетекание воды в другую трещину, которая находится вблизи или пересекает первичную трещину, но глубина которой равна или больше глубины первой трещины. Автор представлял себе это так (рис. 6) [Mavlyudov, 2007].



**Рис. 6. Блок-диаграмма формирования ледниковых колодцев и каналов в основании двух пересекающихся трещин.**

I–I, II–II – плоскости трещин; А, В – номера водных потоков, от которых начинаются каналы. Дальнейшее направление канала после трещины II–II не показано. 1 – условный блок ледникового льда, 2 – трещины, 3 – каналы, 4 – водные потоки.

Если трещина находится вблизи первой трещины, не пересекая ее, то перетекание воды из трещины в трещину может происходить по системе более мелких оперяющих трещин, которые могут соединять между собой более крупные трещины. В этом случае по мелким трещинам возникают сначала небольшие каналы, которые в дальнейшем формируют крупный канал [Schroeder, 1998]. В случае соединения с более глубокой трещиной или трещиной, не выходящей на поверхность, при падении воды в следующую трещину, заполненную воздухом, в ней также возникает колодец, глубина которого будет зависеть от глубины более глубокой трещины. Так, по системам параллельных трещин вода может достигнуть ложа ледника или не достигнуть его. Поскольку большинство исследователей считают, что вода в любом случае достигает ложа ледника [Benn, Evans, 2010], в этом случае представляется, что смачивание ложа ускоряет движение ледника. Хотя и тут не очень ясно, как этот процесс может происходить, если ложе, например, не скальное, а сложено рыхлыми отложениями. Если же вода не достигает ложа, что,

например, наблюдается на некоторых ледниках Шпицбергена и других территорий, то это не может объяснить причину весеннего ускорения движения ледников. Аналогичная картина возникает, если окажется, что и в Гренландии вода через колодцы не может достигать ложа ледникового щита и выводящих ледников. Все это позволяет предположить, что механизм весеннего ускорения ледников может быть иным.

Имеющиеся прямые наблюдения не всегда подтверждают попадание воды на ложе некоторых ледников. В частности, скважины, не достигшие ложа на Южном леднике в горах Святого Ильи (Юкон, Канада) имели точно такие же колебания уровня воды, как и те, что достигли ложа [Rada, Schoof, 2018]. Попытки через штольни, пробитые под ледником Арджантьер (Франция), получить воду с ложа ледника, не увенчались успехом – вода там не была обнаружена. Мало того, подледная лаборатория на том же леднике, часть которой была устроена в полости в тени скального выступа, за период с 1968 г. ни разу не заполнялась полностью водой, и воды в ней, кроме крошечного ручейка, никогда не было [Moreau, 1992, 1995; Benoit et al., 2015].

Скважины, пробуренные на леднике Арджантьер (Франция) в районе переуглубления ложа, показали отсутствие воды на ложе, но выявили зону проницаемости льда на глубине 100 м от поверхности при толщине льда около 230 м [Hantz, Lliboutry, 1983]. На Гренландском ледяном щите имеются некоторые свидетельства сильных внутриледных отражателей радарных волн, которые были обнаружены в районе Шведского лагеря [Catania et al., 2008; Catania, Neumann, 2010]. Эти сильные внутренние отражатели возникли, вероятно, благодаря воде, накопленной внутри льда ледника [Lüthi et al., 2015]. Авторы считают, что очень глубокие, заполненные водой трещины, а не колодцы, являются главными источниками тепла в толще льда в области абляции.

Из всех исследованных 13 колодцев ледника Альдегонда на Шпицбергене, часть из которых обследовалась повторно, ни один не достиг ложа ледника [Мавлюдов, 2022]. Некоторые колодцы в нижней части вскрыли слой прозрачного льда, который типичен для основания многих ледников Шпицбергена, но к самому ложу все обследованные каналы не вышли. Кроме того, ледниковая пещера у северного борта на краю ледника в переуглублениях ложа была внутриледной и только на скальных выступах становилась подледной, поэтому автор сделал предположение о внутриледном положении каналов, отходящих от основания колодцев. Дополнительным подтверждением этой гипотезы является неизменный химический состав вод, втекающих в колодцы на поверхности ледника Альдегонда и вытекающих из пещеры на

языке ледника, что свидетельствует об отсутствии контакта потока внутри ледника с ложем [Борискич и др., 2021]. Колодец на леднике Брёггер на Шпицбергене также заканчивался субгоризонтальной внутриледной галереей [Vatne, 2001]. Аналогичная картина наблюдалась на леднике Ловен средний, где также отмечался внутриледный выход воды на языке ледника [Irvine-Fynn et al., 2005]. Поскольку со временем внутриледный канал, расположенный вблизи ложа ледника, при понижении базиса эрозии потока на языке ледника может углубиться в придонный лед, он может стать впоследствии подледным. Следовательно, не все ледники, имеющие подледный выход воды на языке ледника, сформировали свой внутренний дренаж именно подо льдом. Он мог быть сформирован первоначально внутриледно. Если хотя бы под частью ледников нет воды, то становится непонятным, как происходит весеннее ускорение движения льда и за счет чего формируется в ледниках внутренняя дренажная система.

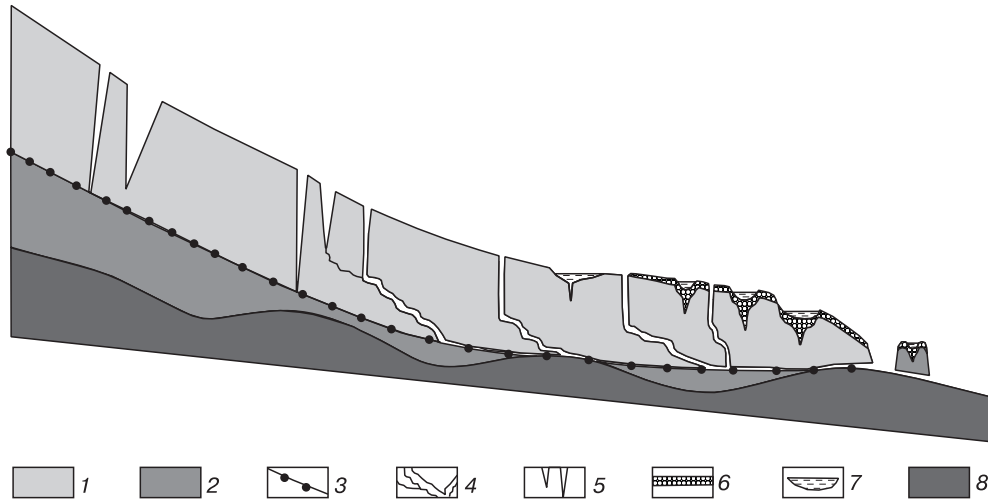
Автор попытался предложить некоторые возможные варианты образования внутренних дренажных систем в ледниках, где сток с поверхности не достигает ложа. Предположений было несколько [Мавлюдов, 2006]. Во-первых, можно было представить, что внутренний дренаж ледника возникает не одномоментно, а формируется постепенно в течение длительного времени. Например, внутренний дренаж мог возникнуть на участке растяжения ледника, где много ледниковых трещин. По мере движения ледника трещины на поверхности закрывались, а каналы внутреннего дренажа при этом сохранялись [Мавлюдов, 1995]. На вновь возникающих трещинах выше по леднику также возникал внутренний дренаж, который объединялся с предыдущим участком. Так постепенно за многие десятилетия и столетия внутренний дренаж мог достичь языка ледника. Теоретически это возможно, а на практике маловероятно, так как в этом случае предполагается, что пещерная система внутри ледника существует десятки, а то и сотни лет, что трудно себе представить в условиях сильно меняющихся ледниковых пещер не только за годы, но и за месяцы. Во-вторых, центральная внутренняя дренажная система ледника могла сформироваться из слияния двух маргинальных систем дренажа при слиянии двух ветвей ледника [Мавлюдов, 1995]. Маргинальные системы каналов формируются по системе параллельных косых трещин, которые возникают при движении ледника. Теоретически такое слияние маргинальных каналов возможно, хотя и не доказано на практике. Однако если такой механизм где-то может быть, и присутствует, то он не способен объяснить формирование каналов на ледниковых щитах, а также объяснить наличие большого числа колодцев на них. Поэтому до настоящего времени

не было предложено ни одного реального механизма формирования внутреннего дренажа для ледников, у которых вода не попадает на ложе.

В некоторых ледниках колодцы с отходящими от них каналами не достигают ложа ледников. Какова может быть причина этого явления? На леднике Альдегонда на Шпицбергене в 2003 г. был обнаружен новый тип внутриледных каналов – плоская щель во льду видимой шириной более 20–30 м и высотой в средней промытой водой части до 0.5 м и менее, по которой поток переносил подледные отложения (перемытая донная моена) [Мавлюдов, 2005]. При понижении базиса эрозии поток начал прорезать в этой щели ледяной каньон, который уже на следующий год превратился в полноценный пещерный канал после смыкания горизонтальной щели пластической деформацией льда. Следы ранее существовавшей щели можно было видеть в течение нескольких лет под плоским потолком канала с двух его сторон в виде зажатых во льду слоев гальки и щебня. Это означает, что до формирования канала существовала некоторая плоскость, по которой возник щелевой канал. По мнению автора, это плоскость надвига, по которой происходило движение льда в основании политермического ледника. Иными словами, в данном случае лед двигался не по ложу, а по плоскости надвига в основании ледяной толщи. И именно плоскость надвига использовалась водными потоками, которые поступали к его поверхности через ледниковые колодцы, для транспортировки к языку ледника. Это означает, что именно смачивание плоскости надвига тальми водами приводит к весеннему ускорению движения льда, которое зафиксировано на многих ледниках. Формирование надвига могло произойти из-за значительного давления воды на границе теплого и холодного льда, которая поступала туда через ледниковые колодцы [Мавлюдов, 2014].

Предположим, что все это верно для конкретного ледника, хотя причина возникновения этого надвига до конца неизвестна. Но означает ли это, что подобное явление широко распространено и может быть обнаружено на других ледниках? Похожая картина наблюдалась на языках ледников Брёггер [Vatne, 2001] и Средний Ловен [Irvine-Fynn et al., 2005] и одном из правых притоков ледника Ааватсмарк [Мавлюдов, 2005]. Исследования автора на теплом леднике Башкара на Кавказе показали, что подледная ледниковая пещера на языке ледника в своей дальней части превратилась во внутриледную, причем имела форму субгоризонтального щелевого канала [Мавлюдов, Solovyanova, 2005]. Наблюдения автора показали, что вода на языке теплого ледника Хайлугоу (Гонгушань, Китай) также выходит из субгоризонтальной внутриледной щели. Как отмечалось выше, на теплом леднике Тиндаль (Аргентина) вода с поверх-





**Рис. 7. Условно схематический продольный разрез через язык ледника или край ледникового щита с внутренней дренажной системой.**

1 – лед, более активно движущийся слой, 2 – более стабильный или “мертвый” лед, 3 – плоскость скольжения, 4 – каналы, 5 – трещины, 6 – моренные отложения, 7 – озера, 8 – породы ложа.

ности не поступает на ложе ледника [Badino, Piccini, 2002]. Это означает, что развитие субгоризонтальных трещин или надвигов возможно не только в политермических, но и в теплых ледниках. Наличие такой плоскости скольжения (надвига) в некоторых случаях может объяснить отсутствие воды на ложе ледника, как это наблюдалось на ложе ледника Арджантьер (Франция) на участках его переуглубления [Hantz, Liboutry, 1983]. В таком случае каналы могут преодолевать переуглубления ложа ледников внутриледно по плоскостям скольжения, а не врезаясь с поверхности льда [Fountain, Walder, 1998]. В работе [Benn, Evans, 2010, p. 68] авторы считают возможным существование трещин выше ложа политермических ледников вдоль контакта холодного и теплого льда, что помогает стоку из ледника внутриледных вод, которым без наличия трещин мешает примороженный к ложу язык ледника.

Не может ли аналогичное формирование надвигов (или плоскостей скольжения) в толще льда возникать и на ледниковых щитах? На ледниковом щите Антарктиды по анализу ледниковых кернов и инклинометрии четырех скважин было обнаружено, что на участке маршрута протяженностью 1400 км в верхней части снежно-фирновой толщи имеется несколько выраженных слоев толщиной около 100 м, по которым идет наиболее интенсивное перемещение льда с разными скоростями [Марков, 2007]. Оказалось также, что верхний слой толщи движется в другом направлении (вплоть до противоположного), чем подстилающий слой. Если такие слои с плоскостями скольжения имеются в Антарктиде, то они могут суще-

ствовать и в Гренландии. Одной из причин формирования подобных слоев в толще Гренландского льда могло быть сохранение захороненного слоя фирна в толще инфильтрационного ледникового льда. И именно этот сохранившийся слой фирна мог стать ослабленной зоной, по которой началось движение верхнего слоя льда. Если такой слой скольжения внутри толщи льда имеется, то он может объяснить и формирование внутренних дренажных систем любой протяженности в ледниках и ледниковых щитах. Такая плоскость скольжения не зависит от неровностей ложа ледника и ледникового щита, а параллельна их поверхности. Это означает, что плоскость скольжения имеет постоянный уклон в сторону языка ледника. Поскольку такая плоскость скольжения находится недалеко от поверхности льда, трещины могут легко достигать ее, а значит, глубина ее расположения будет определять глубину ледниковых колодцев (рис. 7).

Вода, проникающая по трещинам и колодцам до плоскости скольжения, растекается по ней, создавая весеннее ускорение движения льда. Так возникает неэффективная система дренажа [Mavlyudov, 2014]. В течение сезона абляции вдоль плоскости скольжения формируются внутриледные каналы, создавая эффективную систему дренажа. В этом случае суточные колебания уровня воды в колодцах будут соответствовать пропускной способности каналов вдоль плоскости скольжения. С похолоданием каналы на плоскости скольжения закрываются пластической деформацией льда, а весной вновь восстанавливается сток по плоскости скольжения из-за постепенного восстановления

системы дренажа при увеличивающемся уровне воды в колодцах. Сама плоскость скольжения не исчезает, поскольку движение по ней происходит и в зимнее время. Возможно, в некоторых случаях в толще льда на разных глубинах от поверхности может быть несколько таких плоскостей скольжения. Но даже при наличии плоскостей скольжения в толще льда может происходить движение льда по ложу.

Движение льда по плоскости скольжения помогает объяснить образование серджей, прорывов наледных и ледниково-подпрудных озер, а также формирование озов. В частности, озы могут формироваться в том случае, когда плоскость надвига в одной или нескольких точках касается выступов ложа. В этом случае в возникших по плоскости надвига каналах вода будет переносить с выступов материал, который будет откладываться в ледяном русле. В результате таяния льда при деградации ледника материал заполнения каналов будет проецироваться на подстилающий рельеф в виде озов. При заполнении водой ледниково-подпрудных озер часть льда, примыкающего к озеру, всплывает, открывая путь воде к внутренней плоскости скольжения, вдоль которой и происходит формирование канала сброса воды из озера. После ухода воды из озера опустившаяся ледяная плотина перекрывает воде доступ к плоскости скольжения, и вода в котловине озера вновь начинает накапливаться. Наледные озера дренируются через вновь возникающие на их дне трещины, достигающие плоскости скольжения. В тех случаях, когда обилие воды, поступающей с поверхности ледника на плоскость скольжения, не успевает создать дренажные каналы, весь ледник или его часть по смоченной плоскости скольжения начинает двигаться быстрее. Так формируются пульсации ледников, или серджи.

Автору пока неизвестно, существуют ли другие свидетельства присутствия плоскостей скольжения в ледниках и ледниковых щитах. Дальнейшие исследования смогут прояснить этот вопрос.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что колодцы могут формироваться по незаполненным водой трещинам, которые имеют отвод воды в толщу льда, или захороненным ледяным каньонам, глубина проникновения которых определяет глубину колодцев. Дренирующиеся поверхностные озера не могут формировать ледниковые колодцы, а просто расширяют трещины, но если дренаж озер происходил через колодцы, то они сформировались до заполнения озерной котловины водой. Водная струя поверхностного водотока на леднике, падающая в ледниковую трещину, заполненную воздухом, приводит к локальному расширению участка трещины. После смыкания трещины ее расширенный

участок превращается в вертикальный канал – ледниковый колодец. Разбрызгивание водной струи, падающей в колодец, способствует его цилиндрической форме. Спелеологическими методами было установлено, что по крайней мере на нескольких ледниках талые воды, которые поглощаются ледниковыми колодцами, не доходят до ложа ледника. Такие ледники могут быть как политермическими, так и теплыми.

Это не подтверждает общепринятую гипотезу о ледниковых колодцах, которые достигают ложа ледников и ледниковых щитов вне зависимости от толщины и температуры льда. Напротив, гипотеза, основанная на формировании надвига внутри ледяной толщи, по которому развивается плоскость скольжения, объясняет формирование внутреннего дренажа таких ледников. Формирование внутренних субгоризонтальных надвигов в толще льда подтверждено при изучении ледниковых колодцев и пещер спелеологическими методами. Скорее всего, не все ледники имеют внутри ледяной толщи систему надвигов, однако это довольно широко распространенное явление. Именно плоскость такого надвига может служить основой для формирования внутренней системы дренажа, когда вода через ледниковые колодцы поступает на плоскость скольжения. Использование гипотезы присутствия внутриледной плоскости скольжения позволяет объяснить формирование внутренней дренажной сети любого размера в горных ледниках и ледниковых щитах. При наличии таких плоскостей скольжения внутри ледников становится понятной роль ледниковых колодцев, которые являются связующим звеном, транспортирующим поверхностные талые воды на плоскости скольжения ледников и ледниковых щитов и обеспечивающим ускоренное весеннее движение ледников.

*Благодарности.* Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН (АААА-А19-119022190172-5, FMGE-2019-0004).

### Литература

- Борисик А.Л., Демидов В.Э., Ромашова К.В., Новиков А.Л.** Внутренняя дренажная сеть и характеристики подледникового стока ледника Альдегонда (о. Западный Шпицберген) // Пробл. Арктики и Антарктики, 2021, т. 67, № 1, с. 67–88.
- Гляциологический словарь.** Л., Гидрометеиздат, 1984, 528 с.
- Голубев Г.Н.** Гидрология ледников. Л., Гидрометеиздат, 1976, 247 с.
- Мавлюдов Б.Р.** Некоторые вопросы проницаемости ледникового льда // Материалы гляциол. исслед., 1998, вып. 84, с. 60–65.
- Мавлюдов Б.Р.** Внутренние дренажные системы ледников. М., Ин-т географии РАН, 2006, 296 с.

- Мавлюдов Б.Р.** Исследования ледника Тавле и его внутренних дренажных каналов, Земля Норденшельда, Шпицберген // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты, КНЦ РАН, 2007, вып. 7, с. 187–201.
- Мавлюдов Б.Р.** Новый тип ледниковых колодцев // История освоения Шпицбергена и Северной Евразии: Тез. докл. конф., посвящ. 250-летию Рус. науч. экспедиции на Шпицбергене под руководством В.Я. Чичагова (1765–1766). М., Изд-во ООО “ТАУС”, 2015, с. 31–33.
- Мавлюдов Б.Р.** Внутренняя дренажная система ледника Альдегонда, Шпицберген, по данным спелеологических исследований // Пробл. Арктики и Антарктики, 2022, т. 68, № 3, с. 278–307.
- Марков А.Н.** Отличие динамики поверхности ледникового покрова Восточной Антарктиды в интервале глубин 0–200 м от динамики нижележащей толщи льда // Материалы гляциол. исслед., 2007, вып. 102, с. 12–22.
- Триандафилов А.Ф., Ефимова С.Г.** Гидравлика и гидравлические машины. Сыктывкар, Сыктыв. лесн. ин-т, 2012, 212 с.
- Фетисов Ю.М.** Захват воздуха при взаимодействии струи с покоящейся жидкостью: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1995, 24 с.
- Ширяева О.С.** Спонтанный распад струй / О.С. Ширяева, П.А. Григорьев. Ярославль, ЯрГУ, 2011, 204 с.
- Шумский П.А.** Основы структурного ледоведения. М., Изд-во АН СССР, 1955, 492 с.
- Agassiz L.** Etudes et experiences sur les glaciers actuels. Neuchatel, Jent et Gassmann, 1840, 346 p.
- Andrews L.C., Catania G.A., Hoffman M.J. et al.** Direct observations of evolving subglacial drainage beneath the Greenland Ice Sheet // Nature, 2014, vol. 514, No. 7520, p. 80–83.
- Andrews L.C., Poinar K., Trunz C.** Controls on Greenland moulin geometry and evolution from the Moulin Shape model // The Cryosphere Dis. Preprint tc-2021-41, 2021, p. 1–47.
- Badino G.** Ice shaft genesis: a simple numerical approach // Proc. of the 2nd Int. Sympos. of Glacier Caves and Karst in Polar Region, Miedzygorze (Velka Morava, Poland, 10–16 Febr. 1992). Sosnowies, Silesia Univ., 1992, p. 21–27.
- Badino G., Piccini L.** Englacial water fluctuation in moulins: an example from Tyndall Glacier (Patagonia, Chile) // Nimbus, 2002, vol. 23–24, p. 125–129.
- Benn D.I., Evans D.J.A.** Glaciers and glaciation. 2nd ed. London, Hodder Education, 2010, 802 p.
- Benoit L., Dehecq A., Pham H.T. et al.** Multi-method monitoring of Glacier d'Argentière dynamics // Ann. Glaciol., 2015, vol. 56, No. 70, p. 118–128.
- Catania G.A., Neumann T.A.** Persistent englacial drainage features in the Greenland Ice Sheet // Geophys. Res. Lett., 2010, vol. 37, No. 2, L02501.
- Catania G.A., Neumann T.A., Price S.F.** Characterizing englacial drainage in the ablation zone of the Greenland ice sheet // J. Glaciol., 2008, vol. 54, No. 187, p. 567–578.
- Covington M.D., Gulley J.D., Trunz C. et al.** Moulin volumes regulate subglacial water pressure on the Greenland Ice Sheet // Geophys. Res. Lett., 2020, vol. 47, No. 20, e2020GL088901.
- Cuffey K., Paterson W.S.B.** The physics of glaciers. 4th ed. Amsterdam, Holland, Butterworth-Heinemann, 2010, 704 p.
- Das S.B., Joughin I., Behn M.D. et al.** Fracture propagation to the base of the Greenland Ice Sheet during supraglacial lake drainage // Science, 2008, vol. 320, No. 5877, p. 778–781.
- Désor E.** Excursions et séjour dans les glaciers et les Hautes Régions des Alpes. Neuchatel, Kissling, 1844, 638 p.
- Eggers J., Villermaux E.** Physics of liquid jets // Rep. on Progress in Phys., 2008, vol. 71, No. 3, 036601 (79 p.).
- Ervin D.A., Falvey H.T.** Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools // Proc. of the Institution of Civil Engineers. London, Telford, 1987, vol. 83, iss. 1, pt 2, p. 295–314.
- Forbes J.D.** Travels through the Alps of Savoy and other parts of the Pennine chain with observations on the phenomena of glaciers. 2nd ed. Edinburgh, A.&Ch. Black, 1845, 460 p.
- Fountain A.G., Walder J.S.** Water flow through temperate glaciers // Rev. Geophys., 1998, vol. 36, No. 3, p. 299–328.
- Gilbert G.K.** Moulin work under glaciers // Bull. Geol. Soc. Am., 1906, vol. 17, p. 317–320.
- Gulley J.D., Benn D.I., Screaton E., Martin J.** Mechanisms of englacial conduit formation and their implications for subglacial recharge // Quat. Sci. Rev., 2009a, vol. 28, No. 19–20, p. 1984–1999.
- Gulley J., Benn D.I., Luckman A., Müller D.** A cut-and-closure origin for englacial conduits on uncrevassed parts of polythermal glaciers // J. Glaciol., 2009b, vol. 55, No. 189, p. 66–80.
- Hantz D., Llibouty L.** Waterways, ice permeability at depth, and water pressures at Glacier d'Argentière, French Alps // J. Glaciol., 1983, vol. 29, No. 102, p. 227–239.
- Hoffman M.J., Peregó M., Andrews L.C. et al.** Widespread moulin formation during supraglacial lake drainages in Greenland // Geophys. Res. Lett., 2018, vol. 45, p. 778–788.
- Holmlund P.** Internal geometry and evolution of moulins, Storgläciären, Sweden // J. Glaciol., 1988, vol. 34, No. 117, p. 242–248.
- Iken A.** Measurements of water pressure in moulins as part of a movement study of the White Glacier, Axel Heiberg Island, Northwest Territories, Canada // J. Glaciol., 1972, vol. 11, No. 61, p. 53–58.
- Irvine-Fynn T.D.L., Hodson A.J., Kohler J. et al.** Dye tracing experiments at Midre Lovénbreen, Svalbard: preliminary results and interpretations // Proc. of 7th GLACKIPR Sympos. “Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions”. Moscow, Inst. Geogr. RAS, 2005, p. 36–43.
- Isenko E., Naruse R., Mavlyudov B.** Water temperature in englacial and supraglacial channels: Change along the flow and contribution to ice melting on the channel wall // Cold Reg. Sci. Technol., 2005, vol. 42, No. 1, p. 53–62.
- Lüthi M.P., Ryser C., Andrews L.C. et al.** Heat sources within the Greenland Ice Sheet: dissipation, temperate paleo-fire and cryo-hydrologic warming // The Cryosphere, 2015, vol. 9, p. 245–253.
- Massalha T., Digilov R.M.** The shape function of a free-falling laminar jet: Making use of Bernoulli's equation // Am. J. Phys., 2013, vol. 81, No. 10, p. 733–737.
- Mavlyudov B.R.** Caves Investigations at South Iniltchek Glacier, Central Tian-Shan // Actes du 3 Sympos. Int. “Cavites glaciaires et cryokarst en regions polaires et de haute montagne” (Chamonix-France, 1–6 Nov. 1994). Besancon, 1995, No. 34, p. 101–104.
- Mavlyudov B.R.** About new type of subglacial channels, Spitsbergen // Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions. Moscow, Inst. Geogr. RAS, 2005, p. 54–60.
- Mavlyudov B.R.** Internal drainage systems of glaciers // Karst and Cryokarst: Proc. of the 8th GLACKIPR Sympos. Sosnowiec-Wroclaw, Univ. Silesia, 2007, p. 49–64.
- Mavlyudov B.R.** Internal drainage of glaciers and its origin // Proc. of the 6th Int. Workshop on Ice Caves (Idaho Falls, Idaho,

- USA, 17–22 Aug. 2014). Carlsbad (NM), Nat. Cave and Karst Res. Instit., 2014, p. 50–58.
- Mavlyudov B.R.** Possible huge cave system of Southern Inyltchek Glacier, Kyrgyzstan // Proc. of the 18th Int. Speleol. Congress (Lyon, 24–31 July 2022). Vol. 4. Geomorphology. Savoie Mont-Blanc, 2022, p. 357–360.
- Mavlyudov B.R., Solovyanova I.Yu.** Comparison of cold and temperate glacier caves // Proc. of the 6th Int. Sympos. “Glacial Caves and Karst in Polar Regions” (Ny-Alesund, Svalbard, 3–8 Sept. 2003). Madrid, SEDECK, 2003, p. 157–162.
- Mavlyudov B.R., Solovyanova I.Yu.** Caves of Bashkara Glacier (Central Caucasus); morphological features // Glacial Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions. Moscow, Inst. Geogr. RAS, 2005, p. 61–67.
- McGrath D., Colgan W., Steffen K. et al.** Assessing the summer water budget of a moulin basin in the Sermeq Avannarleq ablation region, Greenland ice sheet // J. Glaciol., 2011, vol. 57, No. 205, p. 954–964.
- Moreau L.** Etude sur le relation entre les vitesses de glissement d'un glacier sur un verrou rocheux et son hydrologie (Glacier d'Argentière, massif du Mont-Blanc, France) // Proc. of the 2nd Int. Sympos. “Glacial Caves and Karst in Polar regions” (Miedzgorze, Poland, 10–16 Febr., 1992). Sosnowies, Silesia Univ., 1992, p. 93–103.
- Moreau L.** Argentière Glacier: hydroelectricity and glaciology // Actes du 3 Sympos. Int. “Cavites glaciaires et cryokarst en regions polaires et de haute montagne” (Chamonix-France, 1–6 Nov. 1994). Besancon, 1995, p. 17–22.
- Moreau L.** De l'eau au moulin avec les expeditions “Inlandsis Groenland” // Proc. of the V Int. Sympos. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions (Courmayeur, Italy, 15–16 Apr. 2000). Nimbus, Rivista della societa meteorologica italiana, 2002, vol. 23–24, p. 82–93.
- Myreng S.** Characteristics and long-term evolution of an englacial meltwater channel in a cold-based glacier, Austre Brøggerbreen, Svalbard. MS thesis. Trondheim, Norway, 2015, 76 p.
- Podolskiy E.A., Walter F.** Cryoseismology // Rev. Geophys., 2016, vol. 54, No. 4, p. 708–758.
- Rada C., Schoof C.** Channelized, distributed, and disconnected: subglacial drainage under a valley glacier in the Yukon // The Cryosphere, 2018, vol. 12, No. 8, p. 2609–2636.
- Reynaud L.** The November 1986 survey of the Grand Moulin on the Mer de Glace, Mont Blanc Massif, France // J. Glaciol., 1987, vol. 33, No. 113, p. 130–131.
- Reynaud L., Moreau L.** Moulins Glaciaires des Temperes et Froids de 1986 a 1994 (Mer de Glace et Groenland) // Actes du 3 Sympos. Int. “Cavites glaciaires et cryokarst en regions polaires et de haute montagne” (Chamonix-France, 1–6 Nov. 1994). Besancon, 1995, No. 34, p. 109–113.
- Röösli C., Helmstetter A., Walter F., Kissling E.** Meltwater influences on deep stick-slip icequakes near the base of the Greenland Ice Sheet // J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2016, vol. 121, No. 2, p. 223–240.
- Schroeder J.** Hans glacier moulins observed from 1988 to 1992, Svalbard // Norsk Geografisk Tidsskrift, 1998, vol. 52, p. 79–88.
- Schroeder J.** Moulins of a subpolar glacier seen as a thermal anomaly // Karst and Cryokarst: Proc. of the 25th Speleol. School and 8th Int. GLACKIPR Sympos. Sosnowiec-Wroclaw, 2007, p. 65–74.
- Stenborg T.** Some viewpoints on the internal drainage of glaciers // Sympos. on the Hydrology of Glaciers (Cambridge, 7–13 Sept. 1969). Beligum Gentherrugge, IAHS Publ., 1973, vol. 95, p. 117–129.
- Stuart G., Murray T., Gamble N. et al.** Characterization of englacial channels by ground-penetrating radar: An example from austre Brøggerbreen, Svalbard // J. Geophys. Res., 2003, vol. 108 (B11), p. 2525.
- Trunz C., Covington M.D., Poinar K. et al.** Modeling the impact of moulin shape on subglacial hydrology // Preprint of the Earth and Space Science Open Archive (ESSOAr), 2022, 27 p.
- Tsang C.-F., Neretnieks I.** Flow channeling in heterogeneous fractured rocks // Rev. Geophys., 1998, vol. 36, No. 2, p. 275–298.
- Van der Veen C.J.** Fracture propagation as means of rapidly transferring surface meltwater to the base of glaciers // Geophys. Res. Lett., 2007, vol. 34, L01501.
- Vatne G.** Geometry of englacial water conduits, Austre Brøggerbreen, Svalbard // Norsk Geografisk Tidsskrift, 2001, vol. 55, p. 85–93.
- Vatne G., Irvine-Fynn T.D.L.** Morphological dynamics of an englacial channel // Hydrol. Earth Syst. Sci., 2015, vol. 12, p. 7615–7664.
- Weertman J.** Can a water-filled crevasses reach the bottom surface of a glacier? // Beligum, Gentherrugge, IAHS AISH Publ., 1973, vol. 95, p. 139–145.

## References

- Borisik A.L., Demidov V.E., Romashova K.V., Novikov A.L. Internal drainage network and characteristics of the subglacial runoff of the Aldegonda Glacier (Western Spitsbergen). Problemy Arctiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2021, vol. 67, No. 1, p. 67–88 (in Russian).
- Glyatciologicheskij slovar' [Glaciological Dictionary]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 528 p. (in Russian).
- Golubev G.N. Gidrologiya lednikov [Glacier Hydrology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1976, 247 p. (in Russian).
- Mavlyudov B.R. Some questions of glacier ice permeability. Materialy glatsiologicheskikh issledovanij [Data of Glaciological Studies], 1998, vol. 84, p. 60–65 (in Russian).
- Mavlyudov B.R. Vnutrennie dranznye sistemy lednikov [Internal drainage systems of glaciers]. Moscow, Inst. Geogr. RAS, 2006, 296 p. (in Russian).
- Mavlyudov B.R. Research on the Tavle Glacier and its internal drainage channels, Nordenskiöld Land, Spitsbergen. In: Kompleksnye issledovaniya prirody Spitsbergena [Complex research of Spitsbergen nature]. Apatity, KSC RAS, 2007, vol. 7, P. 187–201 (in Russian).
- Mavlyudov B.R. New type of moulins on glaciers. In: History of Development of Spitsbergen and Northern Eurasia: Abstr. of the Conference devoted to 250 anniversary of the first Russian Scientific expedition on Spitsbergen under the leadership of V.Ya. Chichagov (1765–1766). Moscow, Publ. house TAUS, 2015, p. 69–71 (in Russian).
- Mavlyudov B.R. Moulins on Aldegonda Glacier, Spitsbergen. Problemy Arctiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2022, vol. 68, No. 3, p. 278–307 (in Russian).
- Markov A.N. Difference between the dynamics of the ice sheet surface of East Antarctica in the depth interval 0–200 m and the dynamics of the underlying ice mass. Materialy glatsiologicheskikh issledovanij [Data of Glaciological Studies], 2007, vol. 102, p. 12–22 (in Russian).
- Triandafilov A.F., Efimova S.G. Gidravlika i gidravlicheskie mashiny [Hydraulic and hydraulic machines]. Syvtyvkar, Syvtyvkar Forest Instit., 2012, 212 p. (in Russian).



- Fetisov Yu.M. Air capture during the interaction of a jet with resting liquid. PhD thesis. Moscow, 1995, 24 p. (in Russian).
- Shiryayeva O.S., Grigoriev P.A. Spontanniy raspad struj [Spontaneous disintegration of the jet]. Yaroslavl', 2011, 204 p. (in Russian).
- Shumskij P.A. Osnovy strukturnogo ledovedeniya [Fundamentals of structural ice science]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1955, 492 p. (in Russian).
- Agassiz L. Etudes et experiences sur les glaciers actuels. Neuchatel, Jent et Gassmann, 1840, 346 p.
- Andrews L.C., Catania G.A., Hoffman M.J. et al. Direct observations of evolving subglacial drainage beneath the Greenland Ice Sheet. *Nature*, 2014, vol. 514, No. 7520, p. 80–83. – <https://doi.org/10.1038/nature13796>
- Andrews L.C., Poinar K., Trunz C. Controls on Greenland moulin geometry and evolution from the Moulin Shape model. *The Cryosphere Dis. Preprint tc-2021-41*, 2021, p. 1–47. – <https://doi.org/10.5194/tc-2021-41>
- Badino G. Ice shaft genesis: a simple numerical approach. In: Proc. of the 2nd Int. Sympos. of Glacier Caves and Karst in Polar Region, Miedzygorze (Velka Morava, Poland, 10–16 Febr. 1992). Sosnowiec, Silesia Univ., 1992, p. 21–27.
- Badino G., Piccini L. Englacial water fluctuation in moulins: an example from Tyndall Glacier (Patagonia, Chile). *Nimbus*, 2002, vol. 23–24, p. 125–129.
- Benn D.I., Evans D.J.A. *Glaciers and glaciation*. 2nd ed. London, Hodder Education, 2010, 802 p.
- Benoit L., Dehecq A., Pham H.T. et al. Multi-method monitoring of Glacier d'Argentière dynamics. *Ann. Glaciol.*, 2015, vol. 56, No. 70, p. 118–128. – <https://doi.org/10.3189/2015AoG70A985>
- Catania G.A., Neumann T.A. Persistent englacial drainage features in the Greenland Ice Sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, vol. 37, No. 2, L02501. DOI: 10.1029/2009GL041108.
- Catania G.A., Neumann T.A., Price S.F. Characterizing englacial drainage in the ablation zone of the Greenland ice sheet. *J. Glaciol.*, 2008, vol. 54, No. 187, p. 567–578.
- Covington M.D., Gulley J.D., Trunz C. et al. Moulin volumes regulate subglacial water pressure on the Greenland Ice Sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 2020, vol. 47, No. 20, e2020GL088901. – <https://doi.org/10.1029/2020GL088901>
- Cuffey K., Paterson W.S.B. *The physics of glaciers*. 4th ed. Amsterdam, Holland, Butterworth-Heinemann, 2010, 704 p.
- Das S.B., Joughin I., Behn M.D. et al. Fracture propagation to the base of the Greenland Ice Sheet during supraglacial lake drainage. *Science*, 2008, vol. 320, No. 5877, p. 778–781.
- Désor E. *Excursions et séjour dans les glaciers et les Hautes Régions des Alpes*. Neuchatel, Kissling, 1844, 638 p.
- Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets. *Rep. on Progress in Phys.*, 2008, vol. 71, No. 3, 036601 (79 p.). DOI: 10.1088/0034-4885/71/3/036601.
- Ervine D.A., Falvey H.T. Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools. *Proc. of the Institution of Civil Engineers*. London, Telford, 1987, vol. 83, iss. 1, pt 2, p. 295–314. DOI: 10.1680/iicep.1987.353.
- Forbes J.D. *Travels through the Alps of Savoy and other parts of the Pennine chain with observations on the phenomena of glaciers*. 2nd ed. Edinburgh, A.&Ch. Black, 1845, 460 p.
- Fountain A.G., Walder J.S. Water flow through temperate glaciers. *Rev. Geophys.*, 1998, vol. 36, No. 3, p. 299–328.
- Gilbert G.K. Moulin work under glaciers. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1906, vol. 17, p. 317–320.
- Gulley J.D., Benn D.I., Screamon E., Martin J. Mechanisms of englacial conduit formation and their implications for subglacial recharge. *Quat. Sci. Rev.*, 2009a, vol. 28 (19–20), p. 1984–1999. DOI: 10.1016/j.quascirev.2009.04.002.
- Gulley J., Benn D.I., Luckman A., Müller D. A cut-and-closure origin for englacial conduits on uncrevassed parts of polythermal glaciers. *J. Glaciol.*, 2009b, vol. 55, No. 189, p. 66–80.
- Hantz D., Lliboutry L. Waterways, ice permeability at depth, and water pressures at Glacier d'Argentière, French Alps. *J. Glaciol.*, 1983, vol. 29, No. 102, p. 227–239.
- Hoffman M.J., Perego M., Andrews L.C. et al. Widespread moulin formation during supraglacial lake drainages in Greenland. *Geophys. Res. Lett.*, 2018, vol. 45, p. 778–788. – <https://doi.org/10.1002/2017GL075659>
- Holmlund P. Internal geometry and evolution of moulins, Stor-glaciären, Sweden. *J. Glaciol.*, 1988, vol. 34, No. 117, p. 242–248. – <https://doi.org/10.3189/S0022143000032305>
- Iken A. Measurements of water pressure in moulins as part of a movement study of the White Glacier, Axel Heiberg Island, Northwest Territories, Canada. *J. Glaciol.*, 1972, vol. 11, No. 61, p. 53–58.
- Irvine-Fynn T.D.L., Hodson A.J., Kohler J. et al. Dye tracing experiments at Midre Lovénbreen, Svalbard: preliminary results and interpretations. In: Proc. of the 7th GLACKIPR Sympos. “Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions”. Moscow, Inst. Geogr. RAS, 2005, p. 36–43.
- Isenko E., Naruse R., Mavlyudov B. Water temperature in englacial and supraglacial channels: Change along the flow and contribution to ice melting on the channel wall. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2005, vol. 42, No. 1, p. 53–62.
- Lüthi M.P., Ryser C., Andrews L.C. et al. Heat sources within the Greenland Ice Sheet: dissipation, temperate paleo-firn and cryo-hydrologic warming. *The Cryosphere*, 2015, vol. 9, p. 245–253. DOI: 10.5194/tc-9-245-2015.
- Massalha T., Digilov R.M. The shape function of a free-falling laminar jet: Making use of Bernoulli's equation. *Am. J. Phys.*, 2013, vol. 81, No. 10, p. 733–737. – <https://doi.org/10.1119/1.4819196>
- Mavlyudov B.R. Caves Investigations at South Iniltchek Glacier, Central Tian-Shan. In: Actes du 3 Sympos. Int. “Cavités glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne” (Chamonix-France, 1–6 Nov. 1994). Besancon, 1995, No. 34, p. 101–104.
- Mavlyudov B.R. About new type of subglacial channels, Spitsbergen. In: *Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions*. Moscow, Inst. Geogr. RAS, 2005, p. 54–60.
- Mavlyudov B.R. Internal drainage systems of glaciers. In: *Karst and Cryokarst: Proc. of the 8th GLACKIPR Sympos.* Sosnowiec-Wroclaw, Univ. Silesia, 2007, p. 49–64.
- Mavlyudov B.R. Internal drainage of glaciers and its origin. In: Proc. of the 6th Int. Workshop on Ice Caves (Idaho Falls, Idaho, USA, 17–22 Aug. 2014). Carlsbad (NM), Nat. Cave and Karst Res. Inst., 2014, p. 50–58. – [http://scholarcommons.usf.edu/iwic/Proceedings/Glacier\\_Caves/1/](http://scholarcommons.usf.edu/iwic/Proceedings/Glacier_Caves/1/)
- Mavlyudov B.R. Possible huge cave system of Southern Inyltchek Glacier, Kyrgyzstan. In: Proc. of the 18th Int. Speleology Congress (Lyon, 24–31 July 2022). Vol. 4. *Geomorphology. Savoie Mont-Blanc*, 2022, No. 24, p. 357–360.
- Mavlyudov B.R., Solovyanova I.Yu. Comparison of cold and temperate glacier caves. In: Proc. of the 6th Int. Sympos. “Glacial Caves and Karst in Polar Regions” (Ny-Alesund, Svalbard, 3–8 Sept. 2003). Madrid, SEDECK, 2003, p. 157–162. – <http://sedeck.org/revista/glackma-18.pdf>

- Mavlyudov B.R., Solovyanova I.Yu. Caves of Bashkara Glacier (Central Caucasus); morphological features. In: Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions. Moscow, Inst. Geogr. RAS, 2005, p. 61–67.
- McGrath D., Colgan W., Steffen K. et al. Assessing the summer water budget of a moulin basin in the Sermeq Avannarleq ablation region, Greenland ice sheet. *J. Glaciol.*, 2011, vol. 57, No. 205, p. 954–964.
- Moreau L. Etude sur la relation entre les vitesses de glissement d'un glacier sur un verrou rocheux et son hydrologie (Glacier d'Argentière, massif du Mont-Blanc, France). In: Proc. of the 2nd Int. Sympos. "Glacier Caves and Karst in Polar regions" (Midzregorze, Poland, 10–16 Febr. 1992). Sosnowiec, Silesia Univ., 1992, p. 93–103.
- Moreau L. Argentière Glacier: hydroelectricity and glaciology. In: Actes du 3 Sympos. Int. "Cavites glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne" (Chamonix-France, 1–6 Nov. 1994). Besancon, 1995, No. 34, p. 17–22.
- Moreau L. De l'eau au moulin avec les expéditions "Inlandsis Groenland". In: Proc. of the V Int. Sympos. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions (Courmayeur, Italy, 15–16 April 2000). Nimbus, Rivista della societa meteorologica italiana, 2002, vol. 23–24, p. 82–93.
- Myreng S. Characteristics and long-term evolution of an englacial meltwater channel in a cold-based glacier, Austre Brøggerbreen, Svalbard. MS thesis. Trondheim, Norway, 2015, 76 p.
- Podolskiy E.A., Walter F. Cryoseismology. *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, No. 4, p. 708–758. – <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>
- Rada C., Schoof C. Channelized, distributed, and disconnected: subglacial drainage under a valley glacier in the Yukon. *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, No. 8, p. 2609–2636. – <https://doi.org/10.5194/tc-12-2609-2018>
- Reynaud L. The November 1986 survey of the Grand Moulin on the Mer de Glace, Mont Blanc Massif, France. *J. Glaciol.*, 1987, vol. 33, No. 113, p. 130–131.
- Reynaud L., Moreau L. Moulins Glaciaires des Temperes et Froids de 1986 a 1994 (Mer de Glace et Groenland). In: Actes du 3 Sympos. Int. "Cavites glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne" (Chamonix-France, 1–6 Nov. 1994). Besancon, 1995, No. 34, p. 109–113.
- Röösli C., Helmstetter A., Walter F., Kissling E. Meltwater influences on deep stick-slip icequakes near the base of the Greenland Ice Sheet. *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 2016, vol. 121, No. 2, p. 223–240. DOI: 10.1002/2015JF003601.
- Schroeder J. Hans glacier moulins observed from 1988 to 1992, Svalbard. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 1998, vol. 52, p. 79–88. DOI: 10.1080/00291959808552387.
- Schroeder J. Moulins of a subpolar glacier seen as a thermal anomaly. Karst and Cryokarst. In: Karst and Cryokarst: Proc. of the 25th Speleol. School and 8th Int. GLACKIPR Sympos. Sosnowiec-Wroclaw, 2007, p. 65–74.
- Stenborg T. Some viewpoints on the internal drainage of glaciers. In: Sympos. on the Hydrology of Glaciers (Cambridge, 7–13 Sept. 1969). Beligum, Gentherrugge, IAHS Publ., 1973, vol. 95, p. 117–129.
- Stuart G., Murray T., Gamble N. et al. Characterization of englacial channels by ground-penetrating radar: An example from austre Brøggerbreen, Svalbard. *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108 (B11), p. 2525. DOI: 10.1029/2003JB002435.
- Trunz C., Covington M.D., Poinar K. et al. Modeling the impact of moulin shape on subglacial hydrology. Preprint of The Earth and Space Science Open Archive (ESSOAr), 2022, 27 p. – <https://www.essoar.org/doi/10.1002/essoar.10510851.1>
- Tsang C.-F., Neretnieks I. Flow channeling in heterogeneous fractured rocks. *Rev. Geophys.*, 1998, vol. 36, No. 2, p. 275–298.
- Van der Veen C.J. Fracture propagation as means of rapidly transferring surface meltwater to the base of glaciers. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, L01501. DOI: 1029/2006GL028385.
- Vatne G. Geometry of englacial water conduits, Austre Brøggerbreen, Svalbard. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 2001, vol. 55, p. 85–93.
- Vatne G., Irvine-Fynn T.D.L. Morphological dynamics of an englacial channel. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2015, vol. 12, p. 7615–7664.
- Weertman J. Can a water-filled crevasses reach the bottom surface of a glacier? Beligum, Gentherrugge, IAHS AISH Publ., 1973, vol. 95, p. 139–145.

*Поступила в редакцию 25 мая 2022 г.,  
после доработки – 6 мая 2023 г.,  
принята к публикации 17 мая 2023 г.*