

ГЛАВА 1

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРЕНАЖНЫХ СИСТЕМ ЛЕДНИКОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

1.1. История исследования ВДС

Исследований внутреннего дренажа как системы до настоящего времени не проводилось. Поэтому рассмотрим историю исследований отдельных элементов и свойств ВДС частям как историю исследования проницаемости льда, историю исследования внутреннего дренажа и прямого исследования каналов **ВДС**.

Несколько слов об истории исследования проницаемости льда

Вопросами проницаемости льда и роли воды в жизни ледников впервые заинтересовались ученые-естествоиспытатели, изучавшие горные массивы в Европе. Это были Дж. Форбс, Е. Дезор, Л. Агассис и др.

Рассматривая капиллярные трещины во льду, которые видны только на вертикальных ледяных стенах и вблизи морен ледников, Дж. Форбс полагал, что лед внутри ледников этими капиллярными трещинами разбит на небольшие неправильные многогранники поперечником 3 дюйма или более [233]. В результате таяния льда эти многогранники могли разделяться и распадаться порознь. Но, пока эти многогранники были соединены вместе, трещины между ними позволяли поверхностной воде свободно просачиваться в лед на большую глубину. Несмотря на ошибочность представлений Дж. Форбса о проницаемости льда, своими работами он предвосхитил открытие коры таяния, где при большом размере кристаллов лед действительно может распадаться на отдельные зерна (что особенно типично для полярных ледников). Это становится бесспорным после того, как мы ознакомимся с другой частью его труда. Он упоминает, что эти трещины и зерна льда, на которые трещины разделяют лед, были известны и его предшественникам (Scheuchzer, Hugi, De Charpentier, Agassiz). Наличие таких трещин у морен и у контактов ледника с неподвижными породами не вызывало сомнения, но он был скептиком по поводу распространения трещин по всему телу ледника. В 1841 г. при посещении ледника Аар вместе с Л. Агассисом Жд. Форбс выразил ему свои сомнения и предложил провести такой эксперимент: в углубление во льду влить краску, которая проникнет в трещины и, тем самым, доказать их присутствие. Л. Агассис согласился и решил провести эксперимент сразу же, не пожалев для его проведения двух бутылок красного вина. Но опыт оказался неудачным из-за слабой красящей способности вина и его быстрого разбавления. На следующий год Форбс сам провел аналогичный эксперимент на леднике Мер де Глас (Альпы). Вечером он влил несколько пинт черной типографской краски в небольшое углубление во льду (0,3×0,3 м). В краску были добавлены мелко крошенные кусочки печенья. Посещение этого места на следующий день показало, что краска частично осталась в углублении, а частично распространилась в разные стороны и внутрь льда. Даже кусочки печенья были видны в пузырьках воздуха внутри льда, которые не были связаны с поверхностью видимыми трещинами. На

основании этого эксперимента автор пришел к выводу о том, что ледник летом пронизан для воды на большую глубину. Он полагал, что вода заполняет все поры льда внутри ледника. Летом эта вода никогда не замерзает, а зимой замерзает лишь частично с поверхности льда. Отсюда автор делал вывод, что ледник не представляет собой массу твердого льда, но является смесью льда и воды, которая, в зависимости от состояния влагонасыщенности, обладает той или иной степенью податливости (мягкости). Как видим, автор связывал пластические свойства льда с его влагонасыщенностью, что возможно в скором будущем действительно позволит объяснить быстрые подвижки ледников. А эксперимент с использованием вина и типографской краски на леднике, вероятно, является одним из первых опытов окрашивания ледниковых вод.

Л. Агассиц [157] считал, что большие ручьи, которые поглощаются трещинами, не рассасываются внутри ледника, а продолжают течь в нем по особым каналам. Согласно его опытам удалось выяснить, что имеется и медленное просачивание воды сквозь лед. Оказалось, что из скважины в лед просачивается такое количество воды, которое пропорционально площади стенок скважин. При этом одинаковые скважины в голубом и обычном льду давали разный результат. Для первых была характерна большая водоотдача. По его представлениям большие запасы воды как бы «висят» в толще льда, и ледник представляет собой своего рода губку, которая готова отдавать воду, но никогда не осушается до конца.

Дж. Форбс [234, стр. 166] сообщал, что, когда устанавливались холода, поверхность ледника моментально высыхала, а огромные пористые массы льда начинали дренироваться. Это очень медленный процесс, потому что воде приходится двигаться по длинным и запутанным каналам. Из-за дренажа гидростатическое давление во льду понижалось, что было видно из наблюдений за уровнем воды в вертикальных колодцах любой глубины во льду. После дождей и теплой погоды уровень воды в колодцах рос, после похолоданий – падал.

Хюги (1842), напротив, утверждал, что здоровый (т.е. не трещиноватый) ледник воду не пропускает, что подтвердили его опыты на ледниках [57]. К аналогичным выводам пришел и Форель (1887), который пробовал вводить растворы красок в ледниковый лед под давлением и получил отрицательный результат [57].

С.В. Калесник [57], следуя за Добровольским (1923), считал, что если бы ледник во всех точках имел температуру, отвечающую точке плавления при данном давлении, он был бы насквозь пронизан водой (что и предполагали Л. Агассиц и Дж. Форбс), т.е. находился бы в предельном состоянии (термическое равновесие). При этом каждый кубический дециметр льда мог бы содержать определенное количество воды, которая находилась бы в межзерновом пространстве: на глубине 11 м – 0,047 г, на глубине 110 м – 0,471 г, на глубине 440 м – 1,884 г.

В дальнейшем в XX в. для теплых ледников было принято, что лед это непроницаемая для воды горная порода, которая может пропускать воду только через каналы [409] и поры (межзерновая проницаемость льда) [378]. При этом принято, что каналы могут формироваться по трещинам [338] или врезаться в лед: с поверхности ледника с последующей изоляцией внутри льда [145, 398, 467] или со дна раскрытых трещин [239]. Важность проницаемости льда через межзерновые каналы в последнее время поставлена под сомнение [338].

Как видим, вопросы проницаемости теплого льда научным сообществом в основном решены, хотя отдельные позиции до сих пор дискутируются, но вопросы проницаемости политермического и холодного льда еще не были разработаны.

История исследования внутреннего дренажа

Несмотря на имеющиеся сводные работы [176, 239, 285, 410 и др.] целостная картина строения и развития **ВДС** ледников до сих пор еще не получена.

Одним из первых, кто рассматривал **ВДС** ледников как единое целое, по-видимому, был Дж. Форбс [233, стр. 19]. Он считал, что «вода охлаждается до точки замерзания, просачивается через трещины льда бесчисленными струйками, которые объединяются ниже его массы и разрастаются до главного потока». И далее, «ручейки, которые как усложняющаяся система поверхностного дренажа.... Эти ручейки соединяются и объединяются в более крупные потоки... Они бегут в ледяных каналах, выкопанных ими самими... Они редко, однако, следуют своему курсу далеко, но достигают трещин или полостей в леднике, механически образовавшихся во время движения, они низвергаются каскадом в их ледяные кишки – туда, где они, по всей вероятности, образуют поток, который вытекает с языка ледника» (стр. 21).

В. Хопкинс [289] также считал, что подледниковые потоки образуются при таянии льда на поверхности ледника и проникновении воды вниз до ложа через открытые трещины, и дальнейшего ее движения под ледником. Он также полагал, что эффект действия потоков на нижнюю поверхность ледника из-за гидростатического давления, вероятно, выше их воздействия на верхнюю поверхность ледника. По его мнению, погружающаяся в лед вода должна достигать ложа ледника почти в каждой его точке, но она не может собираться и создавать непрерывные каналы, поскольку они были бы разрушены движением ледника. Существование препятствий движению воды и образование подледных резервуаров, по его мнению, доказывается постоянством потоков, вытекающих с языка ледника в течение ночи, когда таяние на поверхности ледника отсутствует, и когда нет подтока воды с поверхности ледника.

А вот как пишет о дренаже ледников И.В. Мушкетов [123, стр. 647]: «Вода, текущая по поверхности ледника, вливается в расщелины и мельницы, и, проникая в трещину, достигает, наконец, самой глубокой части ледника. Благодаря несколько возвышенной температуре, эта вода, соединенная с несколькими ключами, бьющими со дна глетчера, размывает лед и пробивает себе свободный путь к долине».

Если общий принцип перемещения воды внутри ледника был известен еще с середины XIX века, то, как происходит дренаж внутри ледников, еще долго не было известно. Почти в середине XX века С.В. Калесник [57] писал, что о нем еще почти ничего не известно. На основании результатов работ на Аляске [219] предполагалось, что для крупных ледников внутренний сток в основном приурочен к их краевым частям (к подкраевым каналам). На мелких ледниках внутренний сток мог проходить и по осевой линии ледника. Считалось, что некоторое количество каналов могло быть заложено в толще льда неглубоко от поверхности, по всей видимости, вдоль нижней границы трещин. При отступании ледников подкраевой сток мог превратиться в краевой.

Одним из первых, кто начал рассматривать дренаж ледников как систему был Р. Шреве [439, стр. 210], который «для удобства описания» назвал в теплых ледниках три ее составные части: наледниковая (supraglacial), внутриледниковая (englacial) и подледниковая (subglacial). Он первый показал, что зимой на субполярных ледниках с нулевой температурой льда только у ложа, так же как и в теплых ледниках вся наледниковая составляющая и часть или вся внутриледниковая составляющая будут отсутствовать. То есть с полным набором всех составляющих дренажной системы в ледниках можно иметь дело только летом. Поэтому, рассматривая наледниковую систему дренажа, которая составляет воду во внутриледниковую часть дренажной системы через колодцы и трещины (как сток в карстовых районах), он полагал, что она существует короткие периоды, когда емкость внутриледной и подледной систем дренажа приспособляется к увеличению производства талых вод на поверхности ледника. Рассматривая внутриледную сеть дренажа, он полагал, что она представляет собой древовидную систему каналов, только часть которых достигает поверхности в виде колодцев, поглощающих воду поверхностных водотоков, но большая часть каналов многократно ветвится, собирая воду из сетчатой трехмерной сети межзерновых каналов, движение по которым детально разработано в работе [378].

Г.Н. Голубев [26] предполагал, что гидрографическая сеть ледника представляет собой единую взаимосвязанную гидравлическую систему, но детально ее не рассматривал.

В целом вопросам изучения воды внутри ледников и, в особенности, характера ее движения посвящено множество работ [124, 378, 409 и др.]. Общие принципы строения **ВДС**, предложенные Р. Шреве, сохранились неизменными до нашего времени.

Кроме того, были проведены многочисленные исследования, которые в той или иной мере показывали строение отдельных элементов **ВДС** и особенности их режима. Исследования колебаний уровня воды в ледниковых колодцах показали, что **ВДС** связаны с движением ледников, и что существуют короткопериодные и сезонные изменения в строении ее отдельных элементов [169, 293-195 и др.]. Изучение особенностей ледникового стока позволило определить его составляющие, которые дренируются со льда и из фирновых областей. Оказалось, что большая часть стока осуществляется через каналы с подавляющей пропорцией стока из зоны абляции [26, 136, 239, 279, 468 и др.]. Изучение химического стока с ледников показало, что доля подледниковых вод растет в зимнее время и падает в летнее, когда отмечается приток большого количества талых вод в каналы **ВДС** [279, 321, 468].

Геофизические исследования ледников (прежде всего радиозондирование и сейсмозондирование) позволили обнаружить крупные скопления воды в толще теплых ледников, а также провести границу раздела между слоями холодного и теплого льда в политермальных ледниках [119, 173, 342, 375, 382 и др.]. В некоторых случаях радиозондирование способно показать вероятностное положение внутриледных каналов в пределах ледяной толщи [11].

В изучении **ВДС** возникла достаточно парадоксальная ситуация: к настоящему времени имеется множество модельных работ, посвященных движению воды внутри ледников, несмотря на то, что прямых специальных гляциологических и гидрологических наблюдений в каналах внутри ледников почти не про-

водилось, а те спелеологические исследования, что были проведены на многих ледниках в разных частях мира, авторам моделей не были известны. Получается, то все модельные работы основаны главным образом на косвенных данных. Именно поэтому продолжают споры и дискуссии о деталях строения **ВДС** ледников и форме внутри- и подледных каналов. Предлагаются самые разные теории, объясняющие движение воды в толще льда и под ледником: от разнообразного канализированного [284, 378, 409], до пленочного [378, 438, 472], движения воды через связанные [314], рассредоточенные [176] каналы или в пластичных [176] или жестких [176] моренных отложениях под ледником. Спорят также и о форме каналов во льду и под ледником. Наиболее часто предполагают, что каналы имеют полукруглую (**R** - каналы) или уплощенную форму поперечных сечений, врезаны в ложе (**N**-каналы) или в лед (**R**-каналы), а система дренажа является древовидной [409], сетчатой [176] или неправильной с системой соединяющихся мелких пустот за выступами ложа ледника [314], системой подобных пустот, но прорезанных центральным магистральным каналом [285] и т.д. Спорят и о степени заполнения водой каналов **ВДС** ледников: одни исследователи говорят о постоянной заполненности каналов водой (иногда под давлением) [378, 409, 410 и др.], другие - о частичном заполнении каналов водой [284]. Одни исследователи говорят о важности канального стока внутри ледников [409], другие считают главенствующим насыщенное течение воды в снеге, фирне и порых льда [208]. Таким образом, мы видим отсутствие единого мнения среди ученых по многим ключевым вопросам гидрологии ледников.

Прямые исследования внутренних каналов ледников

Доподлинно не известно, когда ученые обратили свое внимание на полосы в ледниках, которые начинаются эффектным поглощением воды ледниковыми колодцами (мельницами), а заканчиваются выходами воды на языках ледников из ледниковых арок и гротов. Без сомнения, это произошло тогда, когда ученые естествоиспытатели стали впервые знакомиться с ледниками. Но уже в работах конца XVIII века появляются первые упоминания о посещениях ледниковых пещер [191, 419]. Однако это еще не научные исследования, а скорее краткие упоминания, в которых в первую очередь преобладают эмоции. Более детально ранняя история исследований **ВДС** ледников рассмотрена в работах [105, 170].

В своих работах Дж. Форбс отмечал, что при прогревании долин в дневное время таяние льда на ледниках приводит к росту расхода и увеличению мутности вытекающего из под ледника потока воды [233]. В результате постепенного подмывания льда этим водным потоком на языке ледника возникает огромная полость. Дж. Форбс считал, что вода, вытекающая из-под ледника, складывается из нескольких видов: 1) грунтовые воды, которые обеспечивают зимний сток; 2) талые воды, образующиеся на ложе ледника от геотермического тепла (растаявший слой льда очень мал); 3) дождевые воды, тепло которых расходуется на таяние снега и льда на леднике, и которые просачиваются через трещины в толщу льда; 4) талые воды с поверхности ледников (это главный источник воды в летнее время).

Ледниковые колодцы также привлекли внимание наиболее известных естествоиспытателей начала XIX века: Дж. Форбса [233, 234], Л. Агассица [156, 157] и Е. Десора [210], которые многократно посещали ледники Альп. Описыв-

вая ледник Мер-де-Глас, Дж. Форбс [233] указывал на место, которое так и называлось «Мулен» (сейчас оно носит название «Grand Mouline»), о котором особо предостерегали проводники всех, направляющихся в верховья ледника. Это глубокие и почти цилиндрические отверстия во льду, в которые собираются ручейки талой воды из этой части ледника. Вода образует более или менее обильный каскад, водность которого зависит от сезона года. Иногда в колодце возникает два водопада от двух ручьев или один поток разбивается на два каскада. Дж. Форбс отмечал, что вне зависимости от состояния ледника и характера его движения каскады или мельницы (т.е. ледниковые колодцы) всегда находятся почти точно в одном и том же месте, что было замечено по фиксированным объектам на бортах ледника. Описывая верхнюю часть того же ледника, где он образован тремя сливающимися притоками и где его ширина максимальна, Дж. Форбс [233] рассказывал о ледниковом колодце, который, по утверждению проводников, является самым глубоким (105 м по измерениям при помощи лота).

Спускались ли первые исследователи ледников в ледниковые колодцы или нет, также доподлинно не известно. Молва приписывает один из спусков в ледниковый колодец Л. Агассицу летом 1841 г. [301]. Небольшое сообщение повествует, как исследователь на доске, прикрепленной к веревочной петле, спустился в ледниковый колодец, от которого предварительно отвели воду. Основной целью спуска было наблюдение за слоистыми структурами льда. Агассиц вероятно был не только первым, кто спустился в ледниковый колодец, но и тем, кто своими глазами увидел голубые ленты льда внутри ледника. Исследователю удалось спуститься до глубины 37 м от поверхности ледника, где его дальнейший спуск преградила вода. Услышав его крики, товарищи стали его поднимать, но подъем оказался не менее опасен, чем спуск. Препятствием на подъеме были ледяные сталактиты, которые как зубья во множестве унизывали все стены колодца. Агассиц боялся, что сталактиты перережут веревку или упадут на него. Но путь на поверхность прошел без приключений.

Некоторые исследователи считают, что именно пристальное внимание первых естествоиспытателей к ледниковым колодцам показало принципиальную возможность проникновения человека внутрь ледников [170].

Посетив ледник в конце сентября 1842 г., Дж. Форбс отметил, что поверхность ледника была сухой, и на ней не было ручьев, вода даже не стекала в колодцы. При попытке измерить глубину в огромном колодце, Дж. Форбс при обрыве веревки уронил в него свой геологический молоток, который использовал в качестве груза. Этот молоток впоследствии вытаял и был найден на поверхности ледника летом 1857 г. [432].

Когда и где впервые появился термин «мулен» (ледниковая мельница) не известно. Скорее всего, он стал полноправным научным термином, обозначающим ледниковые колодцы, после посещения ледника Мер-де-Глас первыми учеными. Дело в том, что издавна (по крайней мере, с XVIII века) проводники называли место распространения ледниковых колодцев на этом леднике «Мулен», поскольку из них доносился шум воды как на обычных водяных мельницах. Во всяком случае, в своих первых работах ученые называли ледниковые колодцы так: «колодцы или мулены» [157], «каскады или мулены» [233].

На первых порах ученые не только не различали пещеры во льду и пещеры в горных породах, содержащие лед, но и гляциологию, и спелеологию [170].

Потому лед рассматривался ими как карстующаяся горная порода [71, 440]. А. Стопани [446] рисует поперечный разрез ледника, на котором колодец прорезает лед и проникает в окружающую горную породу (Рис. 1.1.). Ледниковые пещеры описывали и другие исследователи карста [например, 171, 190 и др.].

И. Руссел [414] описал много входов в ледниковые пещеры ледника Маласпина, залив Якутат, Аляска. Он отмечал, что колодцы имеют большую глубину. Страшный рев, идущий из скрытых залов, в которые ведут колодцы, говорит, что большие массы воды несутся внизу внутри ледяных пещер. В южной части ледника, где высока интенсивность таяния и много крупных трещин, иногда можно встретить туннели высотой 3-4,5 м, образованные внутриледниковыми водами. Эти туннели иногда соединяют котловины на поверхности ледника. По его представлениям, подледные каналы простирались внутри ледника на 6-8 миль. Считается [например, 240, 268], что И. Руссел сам мог путешествовать на нескольких ледниках по ледниковым туннелям, уходя вглубь них на многие километры. Однако никаких объективных данных об этих и возможно других существовавших путешествиях внутри ледников не сохранилось.

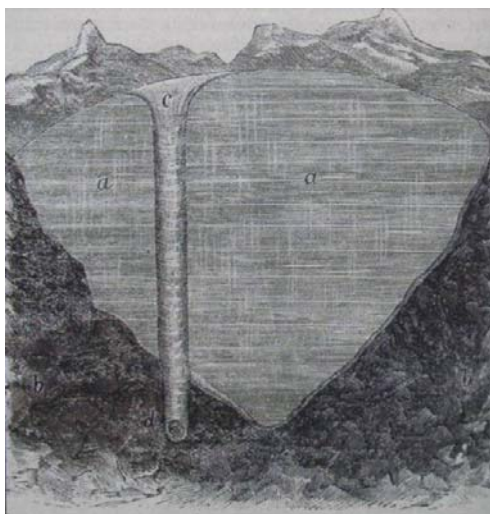


Рис. 1.1. Иллюстрация, показывающая представление о том, что колодец не только пронизывает ледник насквозь, но и углубляется в подстилающие породы, формируя гигантские котлы. а – поперечное сечение ледника, b – горные породы, c – мельница или водопад, d – гигантский котел с валуном [446; по 170].

Точным подтверждением посещения людьми полостей в ледниках стали их планы и разрезы, но первые из них появились только в самом конце XIX века [464].

Некоторые ученые географы видели много общего в образовании ледниковых и карстовых пещер. В 1915 г. об этом говорил известный российский географ А.А. Крубер [71]. С.В. Калесник [56] после изучения ледников в верховьях Нарына (Тянь-Шань), пришел к выводу о схожести ряда явлений на ледниках с карстовыми процессами.

В начале XX века ледниковые пещеры все еще привлекали внимание отдельных исследователей [например, 346], но количество посвященных им печатных работ невелико. И это понятно, ведь посещение ледниковых пещер требует специальной подготовки. И только с развитием спелеологии в середи-

не XX века исследование ледниковых пещер возобновляется, но становится прерогативой почти исключительно спелеологов [265, 388]. В 1960-х – 1970-х гг. спелеологами были поведены исследования довольно большого числа ледниковых пещер в разных точках мира: Шпицбергена [246, 247], США [266-168; 269-271, 369], Аляски [383, 457, 418, 462, 471]. Несмотря на кажущееся обилие исследований, их результаты не стали достоянием гляциологической общественности. Это связано с давними традициями гляциологии, как достаточно обособленной науки. Лишь только небольшая часть исследований, посвященных изучению ледниковых колодцев, попала в гляциологическую литературу [282]. К сожалению, это продолжается и до настоящего времени. Несмотря на уже существующий большой багаж спелеологического исследования ледников [121, 160, 367, 395, 480 и др.], гляциологи не торопятся воспользоваться полученными с таким трудом знаниями.

В настоящее время назрел вопрос обобщения данных имеющихся спелеологических исследований ледников и донесение этих знаний до гляциологов.

1.2. Методическая основа работы

1.2.1. Методы изучения внутренних дренажных систем ледников

Существует множество методов изучения **ВДС** ледников. Поскольку исследование **ВДС** возможно на разных уровнях, то для каждого из них могут оказаться предпочтительными и разные методы исследований. На локальном уровне методы исследования **ВДС** можно разделить на две группы: прямые и косвенные. К прямым относятся методы непосредственного проникновения в полости **ВДС**. Это может быть прямое проникновение в полости человека или какого-либо зонда (лота, бросаемого камня, видеокамеры, датчика давления, бура и др.). К косвенным методам относятся все методы изучения **ВДС** без непосредственного проникновения во внутренние полости ледников, но по которым можно судить об элементах строения или некоторых параметрах **ВДС**: 1) изучения стока из-под ледника; 2) метод трассирования вод от мест поглощения (колодцы, снег и фирн) до мест разгрузки с фиксацией времени добега; 3) изучение характера изтекания внутренних вод ледника (выходы воды изо льда, фонтаны и др.); 4) гидрохимические исследования; 5) геофизические исследования. Сравнительная характеристика методов изучения **ВДС** приведена в табл. 1.1.

Как видим, среди проанализированных методов исследования **ВДС** практически все из них сами по себе не способны дать всеобъемлющую информацию о **ВДС**, о ее строении и свойствах. Практически все методы, за исключением первого, находятся или находились в арсенале гляциологии (ранней и современной) для исследования **ВДС** ледников. Каждый из названных в табл. 1.1 методов не отрицает другого, но для получения более полной информации предпочтительно использовать комплекс нескольких методов. Это не означает, что для выяснения параметров **ВДС** необходимо пользоваться всем комплексом методов. Как правило, время и средства позволяют провести исследования **ВДС** одним или несколькими методами. В любом случае, применение даже нескольких методов существенно повышает их информативность.

Однако только первый метод позволяет прямо наблюдать процессы, происходящие внутри ледника непосредственно в каналах **ВДС**.

Сравнение методов изучения ВДС

Метод	Возможности	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4
Методы прямого проникновения:			
Проникновения человека в каналы ВДС [464]	Наблюдения, измерения, топографическая съемка, фото и видеосъемка	Исследования <i>in situ</i> , непосредственные измерения реальных параметров каналов	Трудоёмкость, необходимость специальной подготовки; недоступны полости с текущей водой и полностью залитые водой
Опускания лота в колодцы [233, 461]	Измерение глубины колодцев	Малая трудоёмкость	Измерения до первого уступа, невозможно проведение при большом расходе воды
Бросания камня с фиксацией времени полета [233]	Измерение глубины колодцев	Малая трудоёмкость, доступность	Трудность точного измерения времени полета, невозможно проведение при стоке воды в колодец
Бурение скважин [124]	Изучение в скважине внутреннего строения льда и внутриледных каналов	Возможность изучения по всей глубине скважины	Технические трудности, локальность, малая вероятность попадания скважины в каналы ВДС и их обнаружения
Спуска видеокамеры (в скважины и колодцы) [275, 386]	Изучение внутреннего строения льда и внутриледных каналов, измерение скорости потоков	Быстрота и малая трудоёмкость, визуализация наблюдений	Технические трудности, локальность
Измерение уровня и давления воды в колодцах [169, 293]	Изучение строения колодца, оценка характера изменения водопрпускной способности ВДС , определение связи колебаний давления со скоростями движения ледников	Простота и информативность метода,	Технические трудности, требует регулярных наблюдений, локализованность (редкость объектов наблюдений)
Измерение уровня и давления воды в скважинах [283, 290]	Оценка характера изменения водопрпускной способности ВДС , определение связи колебаний давления со скоростями движения ледников	Возможность изучения в заданном месте ледника	Технические трудности, малая вероятность попадания скважины в каналы ВДС
Косвенные методы изучения ВДС:			
Изучения стока из-под ледника [124]	Изучение реакции ВДС на изменение стока, изучение прорывов внутриледных емкостей	Высокая информативность	Трудоёмкость, требует регулярных наблюдений; неоднозначность трактовок

Продолжение таблицы 1.1.

1	2	3	4
Метод трас-сирования вод от мест поглощения (колотцы, снег и фирн) до мест разгрузки (время добе-гания) [443]	Позволяет: 1) оце-нить скорости тече-ния воды в каналах ВДС , 2) разделить ледник на водо-сборные бассейны, 3) определить ха-рактер ВДС	Доступность, информативность	Технические трудности, неоднозначность трак-товки
Изучение ха-рактера исте-чения струй из ВДС (фонта-ны, грифоны и др.) [412]	Изучение характера возрождения ВДС	Не требует техни-ческих средств	Редкость и неповсеместность явления, неод-нозначность трактовки
Геофизиче-ские методы [119]	Пространственно-временная вариация содержания воды в ледниках	Большой охват территории	Технические трудности, трудоемкость, неодно-значность интерпрета-ции
Физическое моделирова-ние [110, 121]	Позволяет провести прямые исследова-ния на небольшом искусственно изгото-вленном участке ВДС или ее части при возможности менять параметры течения воды и со-стояния льда	информативность	Технические трудности, трудность перехода от параметров экспери-мента к параметрам реальных ледников
Матема-тическое мо-делирование [409]	Позволяет провести исследование от-дельных участков и всей ВДС в целом при произвольном изменении пара-метров	информативность	Технические трудности, требуют введения дан-ных прямых исследова-ний ВДС , дают качест-венную картину явления
Гидро-химические исследования [321]	Позволяют оценить источник воды, ее возраст, характер водообмена в пре-делах ВДС	информативность	Технические трудности, неоднозначность трак-товок
Дистанцион-ные исследо-вания	Позволяют зафик-сировать положе-ние отдельных эле-ментов ВДС (лед-никовых колодцев и выходов воды из ледника)	информативность	Ограниченные возмож-ности исследований

Поэтому дополнение косвенных методов прямыми исследованиями суще-ственно повышает их информативность. Поскольку на современном этапе ис-

следований **ВДС** катастрофически не хватает данных, характеризующих их параметры на конкретных ледниках, назрела необходимость обобщить имеющиеся данные прямого исследования каналов **ВДС** и развивать это направление исследований в будущем.

1.2.2. Методы исследований, использованные в работе

В качестве основного метода исследований **ВДС**, на котором базируется данная работа, использован карстологический (спелеологический) метод. Именно потому в большей степени работа посвящена изучению доступной для человека части **ВДС** ледников, т.е. ледниковым каналам. Ориентация на этот метод исследований связана не только с профессиональной подготовкой автора, но и с тем, что именно канализованный сток внутри ледников является подавляющим способом передвижения воды внутри толщи льда, о чем будет сказано ниже. Кроме того, этот метод является необходимым дополнением для интерпретации результатов других методов изучения ледников (гидрологического, гидрохимического, геофизического и др.), а также для получения параметров **ВДС**, используемых в математических моделях гидрологических систем ледников.

В настоящем исследовании не только используется карстологический (спелеологический) метод изучения **ВДС** ледников, но и рассматриваются его возможности и преимущества перед другими методами: возможности его самостоятельного использования или его применения в качестве дополнения к анализу данных, полученных другими прямыми и косвенными методами изучения **ВДС**, а также к гидрологическим и гляциологическим методам (балансовый, структурный и др.).

Метод прямого проникновения человека в каналы **ВДС** сопряжен с некоторыми трудностями его применения: 1) возможность исследования полостей только в том случае, когда в них не течет талая вода (это мертвые полости летом и остальные полости с наступлением морозного периода); 2) необходимость использования специального снаряжения (освещение, средства безопасности, альпинистское снаряжение) (рис. 1.2-1.4 на вкладке); 3) необходимость специальной подготовки альпинистским и спелеологическим навыкам; 4) проведение исследований в специфических условиях (темнота, холод, текущая вода и др.).

Однако, несмотря на имеющиеся трудности, только карстологический (спелеологический) метод позволяет получить непосредственно данные о строении **ВДС**, провести прямые измерения всех параметров каналов **ВДС**, изучить характер движения воды в них, выявить строение температурного поля льда вокруг каналов, изучить структуру льда и характера распределения внутриледной трещиноватости, исследовать пластическую деформацию льда *in situ* и т.д. Все эти параметры необходимы для введения в математические модели, а также для интерпретации других косвенных методов для получения адекватной и достоверной информации при моделировании **ВДС** ледников и их влияния на динамику ледников и ледникового стока.

Для исследования воды на поверхности ледников использовался гидрологический метод, при помощи которого изучалось строение и размеры водосборных бассейнов ледниковых колодцев, строение русел водотоков с отдель-

ными измерениями поперечных сечений водных потоков и скоростей течения воды для измерения расходов потоков на поверхности ледников и их языках.

Использование гляциологического масс балансового метода позволило при изучении поверхностной абляции по сети вешек на некоторых ледниках оценить годовой сток отдельных колодцев за период абляции.

Для того чтобы оценить возможность формирования и эволюции каналов в холодном льду использовался метод натурального (физического) моделирования. Для этого в холодной лаборатории была проведена серия экспериментов, в которых при пропускании воды через первичный искусственный канал во льду моделировали эволюцию каналов в ледниках [110, 305].

В связи с некоторой трудоемкостью исследования **ВДС** прямыми методами возрастает значение объективных и более простых методов изучения и прогноза развития **ВДС** ледников. К таковым, по мнению автора, относятся различные методы моделирования и, в частности, метод природных аналогий, который следует считать своеобразной формой моделирования, когда изучаемое явление (или процесс) воспроизводится самой природой (а также провоцируется или инициируется человеком) на другом объекте с сохранением основных (или даже отдельных) характерных для данного явления (или процесса) черт или качеств [76]. Другими словами, изучаемому явлению (или процессу) подыскивается явление (или процесс) – двойник в предположении, что объект и модель сходны между собой в тех случаях, когда при несхожести частностей, обобщенные их качества, признаки претерпевают приближенно подобные (или пропорциональные) изменения. В виде такого явления-двойника для **ВДС** ледников автором были выбраны карстовые дренажные системы, развивающиеся в сравнительно однородных растворимых горных породах. При этом автор руководствовался теорией физического подобия, а также ее гидромеханической модификацией [60]. Основные положения этой теории кратко излагаются в трех теоремах физического подобия, каждая из которых математически доказана и носит общий характер.

1.2.2.1. Экспериментальные исследования

Для получения информации о **ВДС** и их элементов автором проводились полевые исследования на ледниках разных регионов. Исследования **ВДС** теплых ледников осуществлялось на ледниках Медвежий и Абдукагор (Памир), Фишт, Джанкуат, Башкара, Гарабаши, Малый Азау, Колка, Майли, (Кавказ), Мер-де-Глас и Арджантьер (Альпы). Исследования **ВДС** политермальных ледников были выполнены на ледниках Иньльчек (Тянь-Шань), Аксу-Рама (Гиссаро-Алай), Альдегонда, Грэнфиорд, Тавле, Фритьоф, Оватсмарк, Норденшельда, Бертиль, Фалл (Шпицберген). Возможности формирования **ВДС** холодных ледников изучались на ледниках Кангваре (Тибет), Тунге, Баалсруд, Лонгиер, Ларс, Линне, Веринг, Мюррей (Шпицберген), Шах-Даг (Кавказ).

Для изучения **ВДС** на ледниках проводились исследования водных потоков на поверхности ледников, их размеров, расходов воды, измерялась температура воды в потоках разных размеров. В каналах **ВДС** выполнялись следующие исследования: 1) изучались и описывались морфологические особенности строения каналов **ВДС**; 2) проводилась полуинструментальная топографическая съемка полостей, в том числе и при их повторных посещениях; 3) проводились измерения климатических параметров в полостях: температура и влажность

воздуха, скорость ветра; 4) измерялись особенности абляции-аккумуляции льда на стенах полостей; 5) измерялась температура льда; 6) изучалась изменчивость капли со сводов полостей; 6) отмечались уровни стояния воды в полостях (прошлые и на время посещения). Анализ этих данных позволяет получить: параметры каналов **ВДС**, выявить морфологические особенности каналов в разных частях **ВДС**, понять строение отдельных элементов (приуроченность их к структурным элементам ледника) и всей **ВДС**, условия формирования каналов, характер изменения каналов **ВДС** под действием пластической деформации и в результате движения ледника, условия и характер движения воды в каналах, изменение уровня воды в полостях как отражение изменений **ВДС**, распределение поля трещин внутри ледника и особенности формирования каналов по трещинам, соотношение различных элементов в пределах **ВДС** одного ледника, оценку участия разных типов проницаемости льда в транспорте воды, термические условия существования каналов **ВДС** (по данным прямых измерений и косвенных оценок), оценить размеры скоплений воды внутри каналов **ВДС** после прекращения стока, характер заполнения каналов пещерным льдом (наледным и сублимационным) и рыхлыми отложениями, характер движения воздуха в каналах **ВДС** и др.

Полуинструментальная топографическая съемка включает измерения длины и наклона отрезка канала, его ширины, высоты, глубины водоемов, зарисовку поперечных сечений полости, а также общее описание полости [51]. По данным полуинструментального картирования каналов **ВДС** мы получали план и разрезы полости (продольный и поперечные, Рис. 1.5), т.е. ее картографическую модель, а также морфометрические параметры полости: ширина, высота, длина, глубина, уклоны отдельных участков и др.

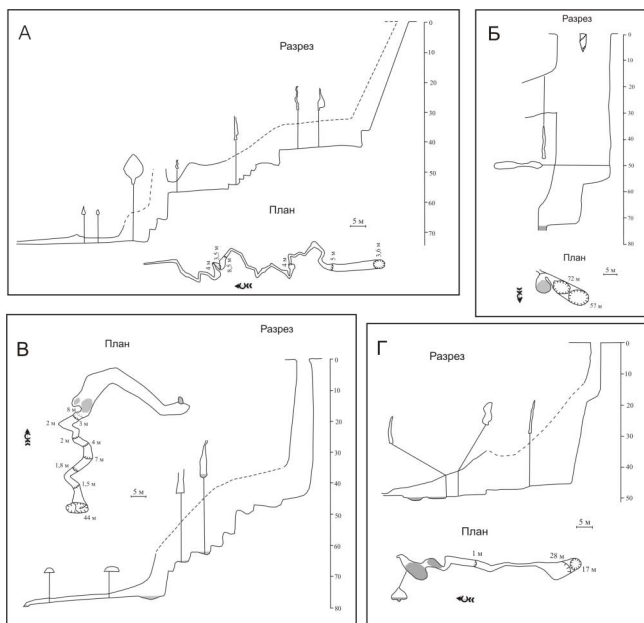


Рис. 1.5. Примеры планов и разрезов и поперечных сечений ледниковых полостей, исследованных на леднике Альдегонда (Шпицберген) в 2004 г.

Этот метод, как и в традиционной спелеологии, использовал мерную ленту и горный компас, преимущества которого обусловлены наличием в его комплекте совмещенных компаса и угломера. Исследование каналов **ВДС** в ледниках разных регионов и в ледниках разных типов и состояния позволили понять строение **ВДС** и найти их общность в ледниках разных типов.

1.2.2.2. Теоретические исследования

Для восполнения пробелов исследований каналов **ВДС** в холодных ледниках и для выяснения возможностей формирования, режима и эволюции каналов в холодном льду были проведены теплофизические расчеты, которые описывали взаимодействие текущего потока и стен трещин и каналов [90, 92, 304, 307, 349, 352]. В исследованиях предполагалось, что канал располагался внутри холодного льда с постоянной температурой, а приток воды ничем не ограничивался. Оказалось, что каналы в холодном льду вполне могут существовать, если в них происходит непрерывное движение воды и если ширина каналов превышает 10 см. Однако, поскольку условия движения воды в холодных ледниках практически никогда не соответствуют необходимым требованиям, поэтому реальные холодные ледники практически не содержат каналов **ВДС**.

Результаты, полученные при теплобалансовых расчетах подтвердили основные идеи, на которых базируется концептуальная модель **ВДС** (смотри ниже).

1.2.2.3. Лабораторные исследования

Анализ имеющейся литературы по движению и замерзанию воды в трубах при отрицательных температурах окружающей среды показал, что некоторые данные из этих экспериментов могут быть использованы для понимания механизмов формирования каналов **ВДС** [96]. Однако, результаты лабораторных исследований, полученные для труб, не всегда могли быть прямо использованы для ледниковых каналов, поскольку важным отличием труб от каналов является то, что трубы служат внешним ограничением каналов и потому не могут дать всей полноты картины их эволюции.

Для преодоления этого недостатка и для определения граничных условий формирования каналов в холодном льду нами была проведена серия экспериментов в холодной лаборатории [110, 305].

Другая цель экспериментов заключалась в том, чтобы на практике проверить теоретические исследования. Правда, при проведении лабораторных исследований также приходилось учитывать то обстоятельство, что они осуществляются не на ледниках, а в условиях холодной лаборатории. При этом предполагалось, что полученных результаты могут быть использованы для перехода от каналов в пределах небольшого ледяного блока к каналам в масштабах реального ледника (при подборе соответствующих критериев подобия). Это особенно важно потому, что идеализация лабораторных экспериментов, механическое перенесения их к масштабам природных пространств и времен привели не одну науку к оторванности от реальных процессов природы.

Во время проведения экспериментов имитировался канал в холодном леднике, для чего в блок прозрачного льда размером 154204100 или 154204200 см вмораживалась круглая полихлорвиниловая трубка. После вытаскивания трубки из льда получали начальный канал. Через этот канал пропускали воду при постоянном напоре. В течение времени эксперимента происходило пре-

образование канала [110, 305]. Экспериментальная установка состояла из ледяного монолита от 1 до 2 м длиной, находящегося в прозрачном пластмассовом контейнере (или иногда без контейнера), термометров, и системы снабжения водой с регулятором температуры (рис. 1.7). В лед вмораживались специальные пластмассовые адаптеры для соединения канала во льду со шлангами, подводщими воду.

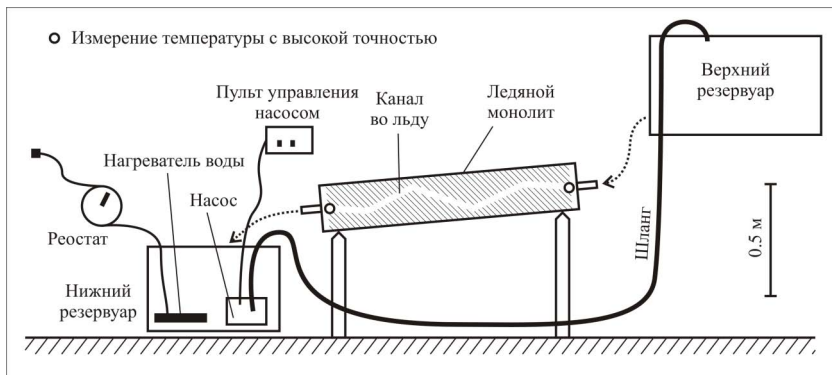


Рис. 1.7. Экспериментальная установка [110].

Вода из верхнего резервуара текла самотеком по шлангу в ледяной монолит и далее через шланг вытекала в нижний резервуар (рис. 1.8 на вкладке).

Затем вода возвращалась в верхний резервуар насосом через дополнительный шланг. Для того чтобы вода в течение экспериментов имела постоянную положительную температуру, она нагревалась в нижнем резервуаре. Температура воды в канале ледяного монолита измерялась с высокой точностью одновременно в двух точках: на входе и выходе из канала. Термометры с меньшей точностью использовались для контроля температуры воздуха в камере льда и воды в обоих резервуарах. Точность измерения параметров и условия экспериментов представлены в таблице 1.3. Чтобы иметь возможность наблюдать движение воды в ледяном монолите и изменение формы канала в течение эксперимента, монолит льда помещался в контейнер из прозрачного плексигласа и в воду добавлялся темно-синий краситель.

Обычно использовался метод послойного намораживания воды при температуре -10°C (для ускорения процесса приготовления ледяного монолита воду заливали слоями толщиной не более 1-2 см в пространство между тесно поставленными в контейнер уже готовыми брусками из чистого заводского льда с проложенной между ними специальным образом пластиковой трубкой – основой будущего первичного канала). Прозрачность льда требовалась для наблюдений за изменением формы канала в течение эксперимента.

Канал создавался вмораживанием в лед: а) эластичной пластиковой трубки с проволокой внутри (чтобы его не пережимало при замерзании льда), б) эластичной пластиковой трубки без проволоки. После проведения нескольких экспериментов остановились на трубке без проволоки, поскольку при послойном намораживании льда трубка не пережималась, но в этом случае также облегчалось извлечение трубки из льда.

Описание методики эксперимента

Монолит льда специально приготавливался для каждого эксперимента в том же контейнере из оргстекла, в котором проводился эксперимент.

Таблица 1.3

Точность измерений и условия проведения экспериментов по эволюции канала в ледяном монолите

Температура воды	0 ~ 2°C (обычно 0,7 или 1,5°C)
Расход воды	4 л/с (постоянный)
Длина ледяного монолита	88 и 168 см
Точность измерения температуры воды в канале	± 0,01°C
Мощность обогревателя	0 ~ 130 Вт
Точность измерения температуры льда и воды в резервуарах	± 0,1°C

Вода в ледяной блок поступала из верхнего резервуара (20 л), который располагался примерно на 0,5 м выше середины блока. Вода по теплоизолированному шлангу текла в монолит самотеком. Интервал изменения напора воды в баке обычно не превышал ±2 л.

Поступление воды в ледяной монолит осуществлялось через предварительно вмораживаемый в лед пластиковый патрубок со сменной заглушкой. Заглушки со специальными переходниками для соединения к шлангам устанавливались во льду после полного промерзания монолита и извлечения пластиковой трубки; они служили местами подвода воды в канал и отвода воды из него.

Ледяной монолит располагался горизонтально (или вертикально) на подставке над поддоном (на случай прорыва воды) в коробе из оргстекла (толщина стенок 10 мм). Торцы к коробу были изготовлены из оргстекла и при изготовлении ледяного монолита прикреплялись к коробу на болтах.

В ходе экспериментов измерялись: температура льда на разном удалении от канала, температура воды в верхнем и нижнем резервуарах, а также на входе в монолит и на выходе из него. Температура окружающей среды также записывалась. Точность считывания температуры льда составляла около 0,1°C (при точности приборов 0,5°C), точность измерения температуры воды 0,01°C (при точности измерения 0,1°C).

Для визуализации изменения формы канала в ходе эксперимента использовалась лампа дневного света (подсветка на просвет) и проводилось окрашивание воды в резервуарах красителем «waterblue» в густой синий цвет. Это позволяло не только визуально наблюдать происходящие в течение времени изменения в канале, но и фотографировать эти изменения.

Эксперимент проводился в течение 1-8 часов до своего логического завершения: а) расширение канала до пластиковой стены, б) достижение квази-

стационарного состояния, в) перемерзание канала, г) разрушение дренажной системы, д) разрушение образца.

После окончания эксперимента установку разбирали. Ледяной монолит извлекали из плексигласового контейнера, разрезали на отдельные бруски шириной около 5 см поперек канала (рис. 1.9 и 1.10). Поперечные сечения канала зарисовывались, сканировались и вводились в компьютер, что позволяло получить объемное изображение канала в момент прекращения эксперимента. После извлечения монолита из контейнера начиналась подготовка к следующему эксперименту.

1.3. Основные принципы карстовой гидрологии и спелеологии, их применимость в ледниковой гидрологии

Многие методы карстовой гидрологии издавна используются в гидрологии ледников. Это индикаторный метод (или метод окрашивания вод), который используется для определения времени добегания, гидрохимический метод, изучение стока из-под ледника, метод ионного паводка для измерения расхода воды в ледниковых потоках. Измерение глубины колодцев с помощью лота и измерения времени полета брошенного в них камня также являются спелеологическими методами. Спелеологическим методом является, без сомнения, и метод прямого исследования ледниковых полостей.

Использование для изучения каналов **ВДС** методической базы карстовой гидрологии и спелеологии вынуждает нас обратить внимание на сходство и различие **ВДС** в этих горных породах [328].

1.3.1. Сходство **ВДС** карста и ледников

Сходство **ВДС** в растворимых горных породах и во льду проявляется в конвергентности форм [224], т.е. в похожести поверхностных и глубинных форм в растворимых породах и во льду.

Сходство **ВДС** определено одинаковыми условиями образования полостей в растворимых горных породах и во льду при наличии: 1) растворимой породы, 2) трещин в ней, 3) растворителя, 4) его движения и агрессивности. Схожесть черт известнякового и ледникового карста также проявляется в подобию характеристик обеих дренажных систем (Табл. 1.4.).

Таблица 1.4

Признаки дренажных систем известняков и льда

Дренажные системы карста	Дренажные системы ледников
древовидные	древовидные
Сингенетичны с рельефом	Сингенетичны с рельефом
Разделяются на поверхностную и внутреннюю	Разделяются на поверхностную и внутреннюю
Наличие эволюционного цикла	Наличие эволюционного цикла
Сезонность развития	Сезонность развития
Зависимость от климата	Зависимость от климата
Зависимость от состояния породы	Зависимость от состояния породы

Несмотря на различие в сущности процессов химического растворения горных пород и физического таяния льда, они приводят к идентичному результату – убыли слоя породы или льда на стенке канала с текущей в нем водой. Не вдаваясь в кинетику процесса химического растворения горной породы текущей водой и рассмотрение процесса таяния льда под действием водного потока на молекулярном уровне, мы можем говорить об общей схожести характера процессов. Эта схожесть процессов определена сходством кривых растворения известняка и таяния льда, которые считаются линейными [154, 245].

Согласно работе [225, стр. 14-16], общая формула растворения известняков на стенке канала с текущей водой может быть написана как:

$$DC/dt = D\Delta C \nu grad C, \quad (1.1)$$

где C – концентрация карбоната в растворе; t – время; D – коэффициент диффузии; ν – вектор скорости течения жидкости.

Для таяния льда на стенке канала с текущей водой можно написать:

$$DT/dt = D\Delta T - \nu grad T, \quad (1.2)$$

где T – температура; D – коэффициент теплопроводности.

Как видим, формулы изменения концентрации карбоната в воде и таяния льда под действием водного потока во времени почти подобны. Именно этим подобием и определяется конвергенция форм в известняках и во льду. А поскольку растворителем в обоих процессах является одно и то же вещество – вода, то это определяет сходство гидравлических процессов в обоих случаях. В качестве примера можно привести ускорение растворения пород и таяния льда при переходе от ламинарного режима течения потока в канале к турбулентному.

И именно это сходство лежит в основе использования данных развития и эволюции **ВДС** в растворимых горных породах и во льду.

1.3.2. Различия дренажных систем карста и ледников

Различия процессов в известняках и во льду определены, в первую очередь, различными физическими свойствами льда и горных пород. В таблице 1.5 показаны некоторые физические свойства известняка и льда.

Таблица 1.5
Сравнение физических свойств известняка и льда [38, 154]

Свойства	Единицы измерения	Известняк	Лед
Плотность	кг/м ³	2500	917
Теплопроводность	Вт/(м·°С)	0,9	2,22
Удельная теплоемкость	КДж/(кг·°С)	2,5	2,12

Как видим, основные различия между известняком и льдом проявляются в плотности пород, которая примерно в 2,5 раза выше у известняка, и в теплопроводности, которая примерно в 2,5 раза выше у льда. Последнее означает,

что при одинаковом приходе тепла к той и другой породе, лед нагреется меньше, чем известняк. Но это также означает, что для охлаждения на одинаковое количество градусов льда и известняка, от первого нужно отвести примерно в 2,5 раза больше тепла, чем от второго.

Но основные различия процессов, происходящих в известняке и во льду, определяются не различием теплофизических характеристик пород, а скоростью их разрушения. Основные различия процессов в растворимых горных породах и во льду определены:

- скоростью протекания процессов, а, значит, и скоростью образования поверхностных и глубинных форм;
- продолжительностью цикла эволюции;
- прекращением развития в зимнее время;
- наличием движения льда;
- наличием пластических деформаций льда;
- способностью льда залечивать трещины и полости;
- влиянием термического состояния льда;
- монолитностью льда, отсутствием в нем некоторых типов трещин;
- отличием химического процесса растворения от физического процесса таяния;
- смещением каналов **ВДС** вниз по леднику в процессе эволюции.

Рассмотрим эти различия более подробно.

Скорость протекания процессов. Скорость таяния льда многократно выше скорости растворения известняка. Если таяние льда под действием разных факторов составляет 2-10 м/год на поверхности и внутри ледников, то растворение известняка не превышает 10^{-5} - 10^{-4} м/год [217], т.е. наблюдается различие скоростей на 5-6 порядков величины.

Вследствие такой большой разницы в скоростях прохождения процессов таяния льда и растворения известняка отмечается различие во времени образования и существования отдельных элементов **ВДС** в известняке и во льду. Если доступные для человека полости в известняке формируются за сотни тысяч – миллионы лет [245], то аналогичные полости внутри ледников возникают за 1-2 сезона абляции [111]. При этом полости в известняках могут длительно существовать после формирования, что определено не только прочностью горной породы, но и малой скоростью поверхностной денудации [16]. Полости во льду существуют лишь непродолжительное время, которое может быть оценено как 1-10 лет, что определено не их вытаиванием, а залечиванием под действием разных причин (есть предположения о более длительном существовании отдельных полостей – от 20 до 50 лет [424, 425]).

Продолжительность цикла эволюции. Различие скоростей образования полостей в растворимых горных породах и во льду отражается и на продолжительности цикла развития карстового рельефа в обеих породах. Если продолжительность цикла развития рельефа в известняках исчисляется миллионами лет [427], то во льду для этого требуются десятки, реже первые сотни лет, что связано с тем, что ледниковый лед большинства ледников полностью обновляется за сотни лет.

Сезонность развития. В известняках сезонность развития карстового процесса зависит от высотного положения карстового массива. В низко расположенных массивах процесс карстообразования происходит круглогодично и в

основном зависит от количества выпадающих осадков. В высоко расположенных массивах в зимнее время происходит ослабление процесса карстообразования из-за выпадения атмосферных осадков в виде снега, из которых только ничтожная часть попадает внутрь массива в это время (из-за таяния на нижней поверхности снега [78]). Во льду отмечается четкая сезонность поступления воды с поверхности внутрь ледника, которая отмечается только в теплое время года, а зимой полностью прекращается. При этом зимний сток с ледников обусловлен не проникновением воды с поверхности ледников, а процессами в толще льда и под ледником.

Движение льда. В отличие от горных пород лед обладает собственным движением с больших высот к меньшим [124], что не может не отражаться на характере изменений **ВДС** ледников. Поля напряжений, возникающих внутри льда, с одной стороны способствует образованию трещин во льду в зонах растяжения [377], которые и являются путями движения воды в толщу льда и по которым возникают каналы **ВДС**, а с другой стороны, они способствуют смыканию этих трещин в зонах сжатия [124]. Смыкание трещин и каналов в процессе движения льда – одна из причин короткого времени существования каналов **ВДС** внутри ледников.

Пластическая деформация льда. Наряду с движением, отличительной особенностью льда по отношению к горным породам является его способность к пластической деформации под собственным весом [124]. Способность льда к пластической деформации приводит к тому, что каналы **ВДС** под действием веса вышележащего льда начинают смыкаться, и, если смыкание не компенсируется растворением льда на стенах каналов, то оно может привести к разрыву сплошности **ВДС** или к полному ее уничтожению.

Термическое состояние льда. В отличие от горных пород, чье термическое состояние мало изменяется во времени и меняется по вполне определенному закону по вертикальному разрезу ($3,3^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) [147] (за исключением промороженных горных пород, которые здесь не рассматриваются, поскольку в них карстовые процессы сильно заторможены или отсутствуют [16]), во льду мы имеем разнообразные термические условия от равномерных нулевых температур в толщах теплого льда до совместимости льдов с нулевой и отрицательной температурой в пределах одной толщи для политермальных ледников и сплошной отрицательной температуры льда в холодных ледниках [58; 124]. Различие температурных условий ледяной толщи в пределах одной полости **ВДС** не может не сказываться на ходе ее развития и эволюции. При этом в холодной части ледяной толщи будет отмечаться понижение скорости процессов расширения полостей по сравнению с участками полости, расположенными в теплом льду. Таких различий в скорости растворения известняков в пределах карстовых массивов не отмечается [42].

Структурные особенности. При образовании известняков карбонатный осадок, возникший на дне моря, претерпевает значительные диагенетические изменения, которые выражаются в его уплотнении, вытеснении воды, перекристаллизации и формировании диагенетических трещин [135]. При формировании известняковой толщи в ней будут выделяться отдельные слои с разными характеристиками (с разной жесткостью, плотностью и пористостью из-за разного содержания карбоната, глины, песчаных зерен в отдельных слоях), что будет проявляться в разнообразии трещиноватости как внутри отдельных

слоев, так и между пластами (трещины напластования) [16]. Таким образом, для известняков характерны диагенетические трещины, трещины напластования и тектонические трещины. При образовании льда из снега и фирна возникает практически монолитная порода, в которой нет диагенетических трещин, слоистости, а, значит, и трещин напластования. Для льда характерны только тектонические трещины.

Отличие химического процесса растворения от физического процесса таяния. В отличие от химического процесса растворения в известняках таяние льда протекает несколько по другим законам. Если начальная агрессивность воды практически одинаково убывает от места поглощения воды вглубь **ВДС** как в известняках, так и во льду, то в дальнейшем начинаются различия. Если в известняках дальнейшая проработка каналов в большой степени связана с паводковыми водами, агрессивность которых из-за большого расхода может сохраняться до выхода каналов из **ВДС**, то во льду агрессивность воды ниже точки влияния нагретых поверхностных вод связана с выделением тепла, которое происходит при переходе потенциальной энергии потока в кинетическую. При этом часть выделившегося тепла (около трети) тратится на трение воды об стены, а остальное используется на нагревание стен и таяние льда [409]. Таким образом, для льда характерно постоянное выделение тепла по длине полости, пока она имеет уклон в сторону языка ледника, т.е. практически по всей длине **ВДС**.

Разница в разрушении поверхностей известняка и льда связана, в основном, с временными параметрами. Если в известняках для проработки каналов требуется бессчетное количество паводков, то во льду действие одного паводка (например, дождевого) способно оказать огромное влияние на расширение каналов. Именно поэтому для ледников в колодцах очень типичны ледяные зубья и фестоны на стенах, образование которых связано с блужданием потока по сечению колодца в зависимости от его расхода и характера падения струи на стену колодца. Для известняков такие структуры встречаются только в редких случаях и нетипичны, т.к. постоянное изменение характера падения воды в колодцы в известняках в течение длительного времени нивелирует неровности стен.

Соотношение породы и растворителя. Если в известняках растворяющаяся горная порода и растворитель являются абсолютно разными веществами с разными физическими свойствами, то для льда растворителем является тоже вещество, но в другом агрегатном состоянии (в виде расплава) [154]. И, если в известняке растворение или осаждение карбоната связано с агрессивностью или насыщенностью растворителя карбонатом кальция, причем растворяющая и отлагающая способности воды четко регламентированы, то во льду в основном ограничена только способность воды расплавлять лед. Поскольку при падении с высоты 100 м вода нагревается на 0,2 °С [48, 78], то 1 литр воды способен растопить около 25 г льда при падении с той же высоты [101]. Но для воды способность замерзать практически не имеет ограничений и зависит только от температуры стен каналов и запаса холода в них (вплоть до полного замерзания воды и превращения ее в лед). Сравнение карстовых систем во льду и в горной породе показано в табл. 1.6 [165].

*Смещение каналов **ВДС** вниз по леднику в процессе эволюции.* Поскольку каналы **ВДС** формируются в движущемся льду, то они не остаются на одном

месте как карстовые каналы, а постоянно перемещаются вниз по леднику. При этом во многих случаях характерна закономерность: на одном и том же месте ледника можно встретить полости **ВДС** примерно в одной и той же стадии развития. Это говорит о том, что скорости развития каналов соизмеримы со скоростями движения ледников. Исключением являются участки ледников с медленным движением льда или его отсутствием, где можно встретить полости в произвольной стадии развития.

Таблица 1.6.

Сравнение характеристик карстовых систем в известняках и во льду [165]

Свойства	Единицы измерений	Лед	Известняк
Растворимость	Мг/л	10^6	10^2
Энергия растворения	Дж/кг	$3,3 \times 10^5$	5×10^6
Типичные неровности	м	0,1	1
Вертикальный термический градиент в толще	°С/км	0	3,5
Шкала времени	годы	10^2-10^3	10^7-10^8

Несмотря на столь большую разницу в физических свойствах известняков и льда, что проявляется в существенных различиях в поведении **ВДС** внутри этих годных пород, общность их строения выходит на первый план, что позволяет говорить об аналогичности строения и эволюции **ВДС** в обеих породах на уровне системы.

Идеологическая близость ледниковой гидрологии с карстовой гидрологией и спелеологией подразумевает не только близость методов исследований дренажных систем в ледниках и известняках, но и близость теорий описывающих зарождение и эволюцию, как отдельных элементов, так и дренажных систем в целом. Именно поэтому многие выводы о строении **ВДС** ледников получены по аналогии со строением систем дренажа в известняках.