

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрен внутренний дренаж ледников. Вопросы его формирования, динамики и эволюции наименее изучены в гидрологии ледников, тогда как внутренний дренаж оказывает большое влияние на их режим. Внутренний дренаж ледников будет рассмотрен как система в широком понимании этого слова.

Система (от греческого **systema** – целое, составленное из частей; соединение) – объективное единство закономерно связанных друг с другом предметов, явлений, а также знаний о природе и обществе. В науке и технике это множество элементов (узлов, агрегатов, приборов и т.п.), понятий, норм с отношениями и связями между ними, образующих некоторую целостность и подчиненных определенному руководящему принципу [125]. В нашем случае систему формируют полости и каналы, обеспечивающие внутренний дренаж ледников.

Внутренняя дренажная система (**ВДС**) ледника представляет собой систему стока воды внутри него. На многих ледниках можно видеть, как вода, текшая в ледяном русле по поверхности ледника, вдруг с оглушительным ревом уходит в зияющее отверстие ледникового колодца (Рис. 1).

С поверхности проследить путь движения этой воды можно максимум на 20-30 м, после чего она буквально исчезает, и увидеть ее удастся только на краю ледника, когда она вырвется из ледникового грота или из-под земли. Что происходит внутри ледника, какой путь там проходит вода, и как он возникает? Какую работу совершает вода и что происходит с ней внутри ледника? На эти и на множество других вопросов на эту тему ответа не было многие годы.

Пытаясь найти ответы на эти вопросы, исследователи применяли всевозможные ухищрения: красили воду, чтобы посмотреть, как быстро она проходит сквозь ледник, мерили расходы вытекающей из него воды, бурили скважины, надеясь попасть во внутренний канал, просвечивали ледник радиоволнами, строили модели. Однако ни один из этих методов до сих пор не помог ответить на поставленные вопросы. Ледники надежно хранят свои тайны.

Если внимательно присмотреться к внутренней системе дренажа ледника, то окажется, что это не обычная природная система. Она полностью скрыта от глаз, и, по сути, мы имеем дело с «черным ящиком» в классическом понимании. Для таких систем известны только вход и выход. Для **ВДС** характерна именно такая ситуация. Тем не менее, помимо этого мы также знаем реакцию системы на изменение внешних условий – на уменьшение или рост количества поглощаемой ледником воды, это позволяет получить самые общие представления и сделать самые общие выводы о структуре системы внутреннего стока в леднике, но все же не позволяет понять, как устроена и как функционирует вся система.

Таким образом, **ВДС** можно изучать на самом общем уровне (вход-выход), что дает возможность оценить баланс энергии и вещества, проходящего сквозь систему.



Рис. 1. Поглощение поверхностного водотока ледниковым колодцем, развивающимся по трещине [447].

При этом могут быть получены общие связи и характеристики системы: потери энергии потоком при прохождении сквозь систему (и соответственно, количество энергии, реализованной внутри нее), изменение количества транспортируемой воды сквозь систему и разницу между входом и выходом, реакцию системы на изменения климата, эволюцию стока воды из ледника во времени, некоторую параметризацию пути течения воды (средний уклон, расстояние между входом и выходом, среднее сечение канала). Этим объем информации, который мы можем получить, исследуя «черный ящик», исчерпывается. Получить больше информации о **ВДС** можно двумя путями: 1) использовать комплекс методов, дополняющих друг друга, и в результате интерпретации результатов добывать новые данные, а затем строить предположения, как устроена **ВДС** или ее часть; 2) непосредственно смотреть, как устроена **ВДС** в действительности. Мы воспользовались вторым методом, но не оставили без внимания и первый.

В последнее время развиваются прямые методы исследования **ВДС** ледников, которые позволяют заглянуть внутрь «черного ящика». Речь идет о спелеологическом исследовании каналов **ВДС**. В книге, предлагаемой читателю, рассмотрены результаты прямых исследований **ВДС**, а также гипотезы и теории, возникшие на их основе.

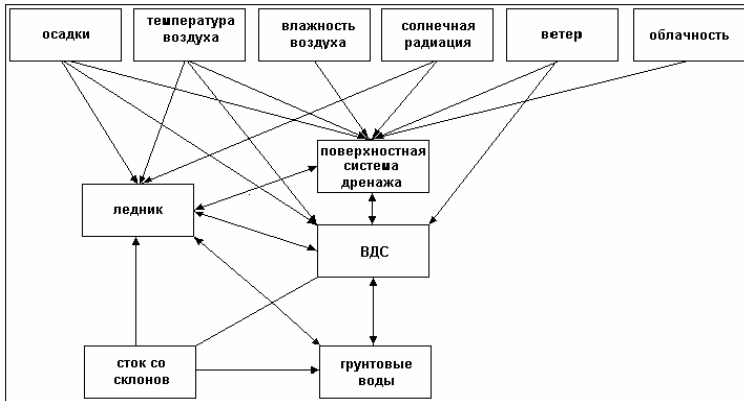
В основу всего исследования положено представление о внутреннем дренаже ледников как о системе [138]. Это позволило не только расширить представление о строении и структуре внутреннего дренажа ледников, но и по-новому взглянуть на результаты уже имеющихся многочисленных исследований.

По нашему мнению, **ВДС** представляет собой совокупность всех скоплений воды внутри ледников - в толще снега, фирна и льда: внутри ледяных кристаллов и между ними, в порах снега и фирна, в каналах во льду и под ледником, в частично или полностью изолированных резервуарах внутри снега, фирна, льда или подо льдом. Все эти водные объекты могут не быть единовременно объединены в одну систему стока воды, но все они способны в разной степени участвовать в ней, прямо или косвенно оказывая влияние на нее.

ВДС существует не сама по себе. Средой или субстратом для ее развития служат ледники. В тоже время сама **ВДС** – элемент ледниковой системы. Основное свойство **ВДС** – быть проводником и аккумулятором воды внутри льда, быстро и беспрепятственно удалять воду с ледяной поверхности. Кроме этой основной функции **ВДС** обеспечивает: поступление вещества и энергии извне внутрь ледниковой толщи, транспортировку растворенных веществ, взвешенных и влекомых наносов, внутреннюю абляцию. Однако значение **ВДС** этим не ограничивается. Каналы **ВДС** – не просто водопроводная система внутри ледяной толщи – они очень быстро передают климатическую информацию внутрь ледников, способствуя быстрому их отклику на изменения климата. При отсутствии **ВДС** ледники не могут быстро реагировать на климатические флуктуации. Именно благодаря присутствию каналов **ВДС** ледникам свойственны сезонные изменения скоростей движения льда, а также устойчивое или неустойчивое его движение в течение всего года. С помощью **ВДС** ледники удаляют угрожающие их стабильности ледниковые озера, благодаря **ВДС** происходят быстрые подвижки ледников, которые представляют собой своеобразную форму разрядки напряжений внутри ледниковой толщи и возвращают ледники в устойчивое состояние.

ВДС заложены в ледниках, являются их составной частью, и потому имеют связи со всеми системами, воздействующими на ледники. Поскольку **ВДС** – открытые системы транзитного типа, то все воздействия на их структуру происходят через поступающую в них воду. На характер ее поступления в систему оказывают влияние следующие факторы: климат (атмосферные осадки, солнечная радиация, температура и влажность воздуха, облачность, ветер), поверхностная абляция на ледниках, сток с окружающих территорий и грунтовый сток (которые частично взаимосвязаны между собой). Взаимодействие климата, рельефа и ледников рассмотрено в работе [20]. Связи **ВДС** со смежными системами показаны на Рис. 1.

Массообмен **ВДС** или обмен массой и энергией внутри нее, их взаимодействие с ледником и окружающей средой очень сильно связаны с массоэнергообменом ледников. Ледники в питаемые ими реки и в каналы **ВДС** отдают талую воду вместе с растворенными и взвешенными примесями, влекомыми зернами снега и обломками льда, принесимыми с поверхности ледников. Внутри ледников реализуется тепло, принесенное с поверхности и возникающее при переходе потенциальной энергии воды в кинетическую. Это тепло реализуется плавление, а иногда и нагрев воды внутри ледников. В **ВДС** поступают рыхлый материал, талый сток вследствие абляции под действием геотермического тепла, а иногда талый сток с прилегающих к леднику склонов. Тепло и некоторое количество воды **ВДС** получают при выделении тепла в результате внутреннего трения льда.

Рис. 2. Связи **ВДС** с другими природными системами

ВДС отдает в окружающую среду ледниковый сток, в некоторой степени преобразованный внутри нее (рост стока за счет внутреннего таяния), подпитывает подледниковые грунтовые воды, оставляет часть влекомых и взвешенных наносов в толще ледника и подо льдом, а также частицы принесенных с поверхности снега и льда, вторичный (пещерный) лед, наростий на стенах каналов.

В водном балансе **ВДС** (стоке через нее) преобладают талые воды, поступающие с поверхности ледника (>97% в случае отсутствия подтока грунтовых вод). Воды, выделяющиеся при таянии льда внутри каналов **ВДС**, даже в теплых ледниках не превышают 2%, а воды, образующиеся при таянии льда на ложе, составляют менее 1%. Вклад грунтовых вод в сток через **ВДС** существенно меняется в разных районах и на разных ледниках, он сильно зависит от геологического строения территории и степени промороженности ложа ледника (его количество может варьировать в широких пределах – от 0 до 10-15% [229]).

Наибольшее влияние на **ВДС** оказывает поверхностная дренажная система ледника. Именно колебания величины притока воды с его поверхности во многом управляют динамикой **ВДС**. При этом и сама **ВДС** может оказывать влияние на поверхностную систему дренажа ледника. Оно может быть прямым (подпруживание потока в каналах **ВДС** может прекратить отток воды с поверхности ледника в **ВДС** и таким образом внести изменения в структуру поверхностного дренажа) или косвенным путем (весенняя перестройка поверхностного стока из-за кольматации трещин и устьев ледниковых колодцев наложенным льдом).

Наиболее сложно взаимодействие **ВДС** с ледником. Ледник вследствие пластичности и текучести стремится заполнить льдом (сжать) любые полости внутри льда и подо льдом, таким образом, пытается ликвидировать и каналы **ВДС**. Согласно принципу Ле-Шателье–Брауна, в сложных системах любое внешнее воздействие на систему рождает противодействие со стороны самой системы [40]. В пределах **ВДС** таяние льда на стенках каналов формирует и поддерживает систему дренажа в функциональном состоянии,

противодействуя силам сжатия льда. Обычно силы сжатия и расширения каналов находятся в динамическом равновесии [409]. Это поддерживает стабильность ледника. Оказалось, что сезонное изменение расхода потока в каналах **ВДС** оказывает наибольшее влияние на активность ледника. Весной происходит восстановление системы каналов, которая была разобшена зимой на отдельные резервуары. Оно происходит за счет формирования трещин во льду под действием избыточного давления воды внутри ледника. Именно это давление и активизирует движение ледников весной. Осенью почти полное прекращение стока воды через каналы **ВДС** ведет к их сжатию и разобщению всей системы на отдельные резервуары, не связанные или почти не связанные между собой. Неполное «схлопывание» каналов осенью – способ «консервации» системы дренажа на зиму и причина достаточно быстрого восстановления цельности **ВДС** с началом снеготаяния. Таким образом, занимая от 1 до 3% объема льда, **ВДС** оказывает достаточно сильное обратное влияние на ледник.

ВДС, как и любая другая система, состоит из подсистем. В качестве подсистем в пределах **ВДС** выделяются система дренажа области аккумуляции и система дренажа области абляции (Рис. 2). Подледная и внутриледная составляющие **ВДС** к подсистемам не относятся, поскольку они не самостоятельны. На одном леднике внутриледная и подледная составляющие **ВДС** могут чередоваться, иногда даже в пределах одного элемента **ВДС** (например, фреатического канала).

ВДС области аккумуляции представлены в основном мелкими каналами внутри снега и фирна, а также некоторым количеством каналов в толще льда и под ним. Во втором случае – это каналы во льду и подо льдом.

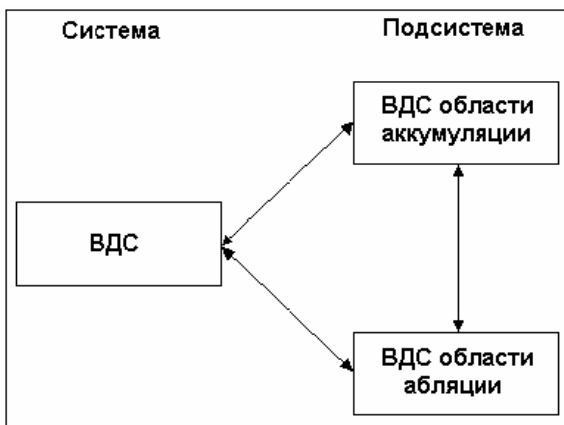


Рис. 3. Деление ВДС на подсистемы.

Наибольшее развитие и наибольшая нагрузка по трассированию воды сквозь ледник приходится на систему дренажа области абляции (около 75%) и только около четверти стока приходится на систему дренажа области аккумуляции. Эти цифры получены, исходя из предположения, что абляция на высоте границы питания ледника примерно равна средней абляции на нем [70]. Меньше всего мы знаем о системе дренажа области аккумуляции,

поскольку все процессы, происходящие в ней, скрыты от глаз. Изучение системы дренажа области абляции стало возможно после применения спелеологических методов, позволивших прямо изучать каналы **ВДС**. Это существенно расширило наши знания о **ВДС** ледников, поэтому дальнейшее изложение материала в книге будет в большей мере посвящено анализу именно этой подсистемы **ВДС**.

Очень кратко рассмотрим воздействие **ВДС** на окружающую среду. Поскольку **ВДС** расположена внутри ледника, то она взаимодействует, в первую очередь, с самим ледником. Например, эффективное развитие **ВДС** приводит к своевременному снятию напряжений в ледяной толще и спокойному движению ледника. Даже сезонные весенние напряжения в ледяной толще, возникающие при затруднении стока воды в толще льда, достаточно легко снимаются при образовании каналов и новых трещин и сбросу воды через них. Таким образом, понижается давление воды внутри льда. Напротив, затрудненное развитие **ВДС** внутри какого-либо ледника ведет к созданию дополнительных напряжений в ледяной толще. Сохранение напряженного состояния ледника в течение длительного времени способно привести к быстрым и катастрофическим подвижкам льда.

В некоторых случаях развитие **ВДС** может оказывать и прямое влияние на рельеф. Иногда это возможно при прямом воздействии подледных каналов на ложе ледника, когда может происходить углубление каналов, врезанных в ложе и, соответственно, вынос материала, образующегося при разрушении горных пород, а также в результате размыва материала донной морены под ледником.

Катастрофические выбросы воды из ледниковых емкостей и ледниково-подпрудных озер способны значительно изменять рельеф приледниковых территорий. Пример – великолепно промытая долина реки Иньльчек вследствие ежегодных попусков из ледниково-подпрудного озера Мерцбахера.

При отсутствии **ВДС** на краю ледниковых щитов происходит постепенное таяние льда, что можно наблюдать на краю ледниковых куполов Северо-Восточной Земли архипелага Шпицберген. При этом воздействия на подледный рельеф минимальны, а моренный чехол на поверхности льда, если он присутствует, проецируется на ложе достаточно равномерно. При интенсивном развитии **ВДС** на краю ледникового шита (ледниковый карст) переработка и перераспределение моренного материала в пределах многочисленных котловин на сильно замороженных частях языков ледников многократно ускоряет таяние льда и ведет к формированию в дальнейшем контрастного холмисто-грядового рельефа на месте отступившего ледника.

Однако **ВДС** может оказывать влияние на рельеф и по-другому. Поскольку **ВДС** – составная часть ледника, она воздействует на него, а ледник в ответ на это действие оказывает влияние на рельеф. Наглядным примером такого взаимодействия могут служить катастрофические подвижки ледников, когда язык ледника «сгребает» все отложения перед собой, создавая вал конечной морены. Нередко за этим валом начинает формироваться морено-подпрудное озеро.

В этом разделе мы очень кратко остановились на общих представлениях о **ВДС** ледников. В дальнейшем изложении мы рассмотрим **ВДС** более подробно как в целом, так и по частям, а также проанализируем источники

формирования и строение дренажных систем ледников, условия и предпосылки формирования и существования **ВДС**, их классификации, описание различных типов, параметры элементов **ВДС**, размеры **ВДС**, особенности строения **ВДС** в ледниках разных типов, этапы формирования, динамику эволюцию и возраст **ВДС** в разных ледниках, связь дренажных систем со строением, размерами и эволюцией ледников, значение **ВДС** в динамике ледников и географические закономерности распространения **ВДС**, а также использование результатов исследования дренажных систем ледников.

Сокращения принятые в работе

ВДС – внутренняя дренажная система;

ELA – высота границы питания.

В работе приняты основные гляциологические термины и значения параметров, характеризующие свойства снега и льда, ледников и их гидрологию в соответствии с работами [22, 124]. Поскольку часть терминов, использованных в книге, заимствованы из разных дисциплин, мы посчитали целесообразным в ее конце поместить толковый словарь терминов.

Все представленные в работе фотографии, кроме специально оговоренных, выполнены автором.

Благодарности

Автор благодарен коллективу отдела гляциологии Института географии РАН и его заведующему академику В.М. Котлякову за поддержку и внимание к данному исследованию. При подготовке работы автор пользовался советами и помощью многих специалистов, в том числе С.М. Архипова, А.Ф. Глазовского, В.Н. Голубева, М.Г. Гросвальда, Н.В. Давидович, В.А. Жидкова, И.А. Зотикова, А.Б. Казанского, В.Г. Коновалова, Ю.Я. Мачерета, М.Ю. Москалевского, О.В. Рототаевой, А.В. Сосновского.

Автор также благодарит всех, кто помогал ему в получении полевой, литературной, фондовой и картографической информации, связанной с изучением **ВДС** ледников в разных регионах нашей страны и всего мира. Автор благодарен Е.В. Исенко и Р. Нарусе за помощь в организации и проведении экспериментов по изучению эволюции каналов в холодном льду и выражает особую благодарность всем спелеологам, помогавшим ему в изучении ледниковых пещер. Автор благодарит И.Ю. Соловьянову за помощь в графическом оформлении работы, а также всех, кто предоставил фотоматериалы (Н.И. Осокина, Е.В. Исенко, В.Д. Травина, И.Ю. Соловьянову).