

## ГЛАВА 6

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗУЧЕНИЯ ДРЕНАЖНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СТРОЕНИИ И СОСТОЯНИИ ЛЕДНИКОВ

### 6.1. Использование изучения элементов *ВДС* для разных целей

На раннем этапе исследования ледников элементы *ВДС* использовали в основном для изучения структуры льда, поскольку они представляли собой полости, через которые можно было проникнуть внутрь ледника. Сначала для этого использовали пещеры на языках ледников и трещины в средней части ледников, в которые можно было легко спуститься без специального снаряжения. Начиная с середины XIX века, исследователи неоднократно спускались в трещины и ледниковые колодцы, чтобы понять, что представляет собой слоистость льда и как она меняется с глубиной. Для тех же целей посещались и ледниковые пещеры на языках ледников. Обнаружив, что ледниковые колодцы постоянно образуются на одном и том же месте взамен сдвигающихся колодцев, Форбес и Агассис, а впоследствии Тиндаль, использовали последние для измерения скорости движения льда (смотри главу 1). В середине XIX века также существовало убеждение, что трещины и ледниковые колодцы пронизывают ледники насквозь, потому измерение глубины колодцев считалось важным атрибутом исследований, чтобы понять толщину льда ледников. При измерении глубины к грузу (лоту) на длинной веревке специально привязывали кусочек сала, чтобы прилипшая к нему почва подтвердила, что достигнуто ложе ледника [233, 461]. Вот как об этом пишет В.Н. Мушкетов [123]: «Мельницами пользуются иногда для приближенного определения толщины глетчера: можно или бросать туда камни и наблюдать время их падения, или опускать веревку с привязанной к ней тяжестью. Посредством таких измерений нашли, что толщина альпийских ледников достигает 250-300 и даже 500 м». Очень большие величины толщины ледников, приведенные В.Н. Мушкетовым и отсутствующие у Дж. Тиндаля, вероятно, связаны с тем, что на каком-то этапе приготовления книги фунты из оригинала были случайно заменены метрами.

В последующем посещение ледниковых пещер (очень редко колодцев) проводилось с целью понять, что происходит внутри ледников. Началось это с Ж. Валло, который специально спускался в колодец Гранд Мулен (ледник Мерде-Глас, Альпы), чтобы понять как он устроен [464]. Именно посещение внутриледниковых полостей впоследствии помогло Дж. Наю, Р. Хуку, Х. Ротлисбергеру, Р. Шреве, Л. Ллибутри и Дж. Виртману построить свои теории движения воды в ледниках, а также по-другому взглянуть на характер движения ледников [284, 378, 337, 409, 439, 473]. Поскольку посещение колодцев практически невозможно в течение лета (обычного гляциологического сезона), их изучали для проведения косвенных наблюдений за строением *ВДС*. Колодцы использовались и для измерения давления, чтобы понять их строение и показать влияние воды на движение ледников [293, 371]. Окрашивание вод, стекающих в колодцы, позволило определить скорости движения вод внутри ледника [444-446], а изучение расходов на выходе из ледника доказало существование временами опорожняющихся ледниковых емкостей [135]. Изучение гидрохимии вод, вы-

ходящих из-под ледников, позволило доказать водообмен ледниковых вод с грунтовыми водами [259, 395] и карстовыми водами [441]. Исследования в ледниковых пещерах и специально пробитых под ледниками туннелях помогли понять строение льда в нижней частях ледников, насыщенность их моренным материалом, а также определить источник поступления моренного материала [133].

В последнее время пытаются знания, полученные при изучении **ВДС**, а также следов, оставленных ими в растворимых породах на ложе ледника, использовать для объяснения быстрых подвижек ледников [180, 314, 438].

Со второй половины 20 века начинается изучение ледниковых пещер спелеологами. На первом этапе это дает очень небольшой выход для гляциологии, за исключением того, что исследование ледниковых пещер показало строение элементов **ВДС** на ледниках в разных регионах мира, а также изменение строения и изменения **ВДС** отдельных ледников во времени. Специальные исследования позволили измерить пластическую деформацию в толще льда в естественных условиях, изучить влияние воздушных потоков на моделирование полостей [223, 347], характер таяния льда внутри пещер [81], исследовать биологические объекты внутри ледниковых пещер [273]. В последнее время появляется все больше теоретических разработок, пытающихся объяснить образование и особенности **ВДС** ледников [167, 168, 225, 349, 352, 410, 422, 423,]. По-видимому, это будет продолжаться и в будущем.

Воды **ВДС** используются для водоснабжения поселков [30] и обеспечения водой гидроэлектростанций [179, 244].

Особняком стоит использование ледниковых пещер в качестве экскурсионных объектов. В качестве примера можно привести пещеру ледника Парадайс (гора Гарньер, Кордильеры), которая посещается туристами с начала XX века [270] (Рис. 6.1 на вкладке). Известны экскурсионные пещеры в ледниках и в других частях США [369], экскурсии проводятся также во внутриледные каналы ледника Лонгиер (Шпицберген).

Большой зрелищностью отличаются также и искусственные полости внутри льда, специально сооружаемые ежегодно для туристов на многих ледниках Европы (например, на леднике Мер-де-Глас (Франция), Алечском и Ронском ледниках (Швейцария) и других ледниках в Альпах) (Рис. 6.2 на вкладке). Например, на Алечском леднике подобный экскурсионный объект (Ледяной дворец) был сооружен еще в 1934 г. (и функционирует до сих пор) у конечной станции железной дороги Джунфрауджох на высоте около 3400 м. Здесь во льду вырублены туннели с ответвлениями и расширениями (рис. 6.3 на вкладке).

В ледяных нишах сооружены всевозможные скульптурные изображения изо льда: избушки, бары, гостиничные номера с кроватями, столами и стульями, автомобили, фигуры людей и животных, птиц, пингвинов и др. (Рис. 6.4 на вкладке).

В тех странах, где нет ледников, практикуют строительство искусственных туннелей в том льду, который имеется в этих районах, в частности, в пещерном льду. Например, в оборудованной для экскурсий Добшинской пещере (Балканы), для которой характерен большой объем многолетнего наледного льда, часть экскурсионного маршрута проходит внутри ледяного туннеля, прорубленного в ледяной толще. Некоторой отдаленной имитацией очень зрелищных

каналов ледниковых пещер являются и другие экскурсионные пещеры со льдом внутри горных пород. Например, в Кунгурской пещере (Урал) проход между гротами Бриллиантовый и Полярный был прорублен во льду [91]. Подобные туннели известны в пещерах Деменовская и Добшинская (Балканы) [41], пещере Айсризевельд (Альпы) (Рис. 6.5 на вкладке) и других пещерах.

А в тех странах, где нет крупных или постоянных скоплений льда внутри пещер, делают специальные сооружения из искусственного льда внутри гигантских холодильников (размером с двухэтажный дом). Это так называемые «ледяные дома», которые можно встретить в разных местах, например, в городе Отару (остров Хоккайдо на севере Японии). Здесь проложены туннели, выложенные плитами искусственного льда, выставлены многочисленные скульптуры из льда (снеговики, животные и др.), а также представлены всевозможные сооружения (смотровые площадки, горки для катания и др.). В зимнее время во время снежных фестивалей в Японии нередко кроме всевозможных фигур и сооружений, строят и искусственные ледяные туннели.

Видимо исследования ледниковых пещер натолкнули военных на строительство искусственных сооружений внутри льда. Классическим примером этого являлось военное поселение Кемп Сенчури внутри снежно-фирновой толщи на северо-западе Гренландского щита, которое функционировало несколько лет в разгар холодной войны в 1960-х годах (сооружение располагалось примерно в 300 км от американской военной базы в Туле) (Рис. 6.6) [240].

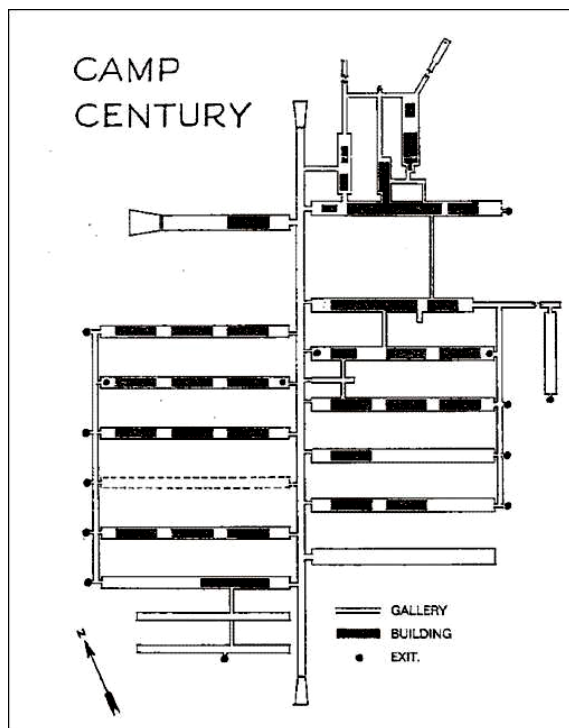


Рис. 6.6. План туннелей поселка Кемп Сенчури, располагавшегося внутри снежно-фирновой толщи на краю Гренландского ледникового покрова в районе Туле. Gallery – туннели, Building – строения, Exit – выход [240].

Энергией поселок снабжала небольшая ядерная электростанция. Идеей расположения поселения внутри ледяной толщи явилось то, что его невозможно будет обнаружить с помощью радаров с самолетов и из космоса. Это оправдывалось также и тем, что проходка туннелей в толще снега и льда была намного проще, чем внутри толщи горных пород. Большие проблемы при существовании этого поселения были связаны с таянием льда вокруг жилых помещений, высокая влажность воздуха и пластическая деформация льда, которая стремилась сомкнуть каналы. Поселок стал базой и для научных исследований. В частности, неподалеку от поселка была пробурена скважина до ложа ледника, для бурения которой вероятно была использована энергия ядерного реактора.

В непосредственной близости от военной базы Туле были проложены и другие крупные туннели, которые специально вырубались в ледниковом льду для научных и военных целей (рис. 6.7). Туннель, приведенный на рисунке, специально имел уклон ко входу, чтобы существовал естественный сток талых вод из полости. В туннеле были отработаны различные методы его проходки: от ручной до механической. В туннеле удалось провести исследования структуры льда и содержания моренного материала внутри ледяной толщи.

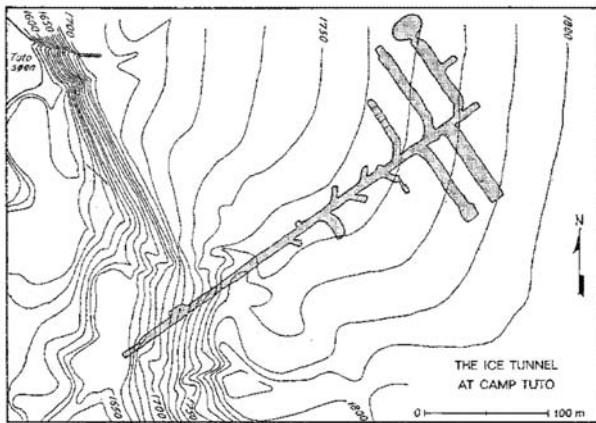


Рис. 6.7. План туннеля внутри ледникового льда на краю Гренландского ледникового покрова близ Кемп Туто в Туле [240].

В конце 1960-х гг. все сооружения во льду близ военной базы в Туле были заброшены. Через несколько лет Кемп Сенчури был полностью погребен снегом.

## 6.2. Изучения **ВДС** для получения информации о строении и состоянии ледников

Исследование **ВДС** ледников ведет к получению целого блока разнообразной информации, в состав которого входят сведения о самом леднике (о строении и температуре льда, его физических и пластических свойствах, строении ледяной толщи, содержании моренного материала в толще льда и др.), о **ВДС** в толще льда (параметры каналов **ВДС**, эволюция отдельных кана-

лов и всей **ВДС**, характер взаимодействия текущей воды и льда, характер шероховатости и форма русел и т.д.), а также сведения об активности самого ледника и о тенденциях изменения климата региона, где расположен ледник [113, 357].

Эта информация может быть получена как при прямом изучении ледников и их **ВДС**, так и при дистанционных исследованиях дренажных систем ледников.

### 6.2.1. Получение информации при непосредственном изучении **ВДС** ледников

При непосредственном изучении **ВДС** и их элементов существует возможность получить информацию об отдельных элементах строения и состояния вмещающих их ледников. В одних случаях эта информация является четкой и однозначной, в других – вполне вероятной, а в третьих – только предположительной.

В таблице 6.1 суммирована информация, которую, по нашему мнению, можно получать о ледниках, изучая их **ВДС**.

Таблица 6.1

Информация о леднике, получаемая при изучении **ВДС**

Признак	Информация
<b>Ледниковые колодцы</b>	
Присутствие колодцев	- наличие <b>ВДС</b> - политермальный или теплый ледник
Линейное расположение колодцев	фиксирует положение выступа на ложе
Наличие малого числа колодцев	- активный ледник - тонкий слой теплого льда
Колодцы на одном месте ( <i>линейная схема</i> ) (Рис. 6.8Б)	- выступ на ложе - движение ледника
Колодцы меняют местоположение во времени в пределах одной зоны ( <i>каскадная схема</i> ) (Рис. 6.8А)	- неравномерное движение ледника
Колодцы меняют местоположение во времени произвольно ( <i>пунктирная схема</i> ) (Рис. 6.8В)	- нет установившейся структуры <b>ВДС</b>
Наличие заросших льдом колодцев	- политермальный ледник
Большое количество заросших льдом колодцев разного возраста	- более активный участок ледника - быстро меняющаяся часть <b>ВДС</b>
Колебание уровня воды в колодцах	- изменение пропускной способности <b>ВДС</b>
Суточный ход колебаний уровня воды в колодцах	- слабая пропускная способность <b>ВДС</b>
Одинаковая глубина входных колодцев	- соответствует толщине слоя холодного льда
Глубины входных колодцев менее 20 м	- теплый ледник
<b>Ледниковый грот</b>	
Наличие ледникового грота	- наличие <b>ВДС</b> - политермальный или теплый ледник
Стабильное положение грота	- малоподвижный ледник (скорость движения примерно равна интенсивности поверхностной абляции)
Грот в конце ледяного каньона	- мертвый лед, отступающий ледник
Рост стока с ледника во времени (в многолетнем разрезе)	- увеличение площади зоны абляции (потепление климата)
Уменьшение стока с ледника во времени (в многолетнем разрезе)	- уменьшение площади абляции (похолодание климата, сокращение размеров ледника) - перехват стока другой (карстовой) водоносной системой

Продолжение таблицы 6.1

<b>Территория, освободившаяся ото льда</b>	
Следы каналов за скальным выступом ложа	- длительный период устойчивого движения ледника
Врез ущелий в рыхлые подледниковые отложения	- малоактивный ледник
Подвижный мелко холмистый рельеф с озерами	- в ядре мертвый лед
Каньоны в коренных породах	- положение каналов подледной <b>ВДС</b> - морозное выветривание сильно трещиноватых пород (примороженный язык политермального ледника)
Комплексы перемытых моренных отложений у языков ледников	- наличие сбросов воды из ледниковых или подледных озер
Мелкие воронки на перемытых моренных и русловых отложениях у языков ледников	- вынос обломков льда из-под ледников (оседание сводов каналов <b>ВДС</b> ) - наличие сбросов воды из ледниковых или подледных озер
<b>Рельеф моренного чехла на языке ледника</b>	
Спокойный сглаженный	- мощный моренный чехол - спокойный ледник
Холмистый с озерами и котловинами	- зрелая стадия «ледникового карста» - малоподвижный ледник - язык ледника после пульсации
<b>Водотоки на поверхности ледника</b>	
Глубокий врез русел в лед	- деградация ледника
Стабильное положение русел	- мертвый лед, деградация ледника
Большая протяженность	- малоподвижный ледник
Короткие водотоки	- активный ледник
Резкое исчезновение водотоков	- быстрая подвижка ледника
Загущение русловой сети во времени	- потепление климата
Разрежение русловой сети во времени	- похолодание климата
Петельчатый рисунок поверхностных русел + большое количество мелких озер	- ледник после подвижки (пульсации)
<b>Наледи</b>	
Наледи у языков ледников	- наличие <b>ВДС</b> - теплый или политермальный ледник
Изменение положения наледи	- перестройка <b>ВДС</b> - изменение характера движения ледника
<b>Наледниковые озера</b>	
в верхней части ледника	- активный ледник - слабо развит поверхностный дренаж
В нижней части ледника	- малоподвижный или мертвый лед
Рост размеров озер во времени	- малоподвижный или мертвый лед
<b>Приледниковые озера</b>	
Рост размеров озер по бортам ледников	- малоподвижный ледник
Рост размеров озер у языков ледников	- отступающий ледник - деградация языка пульсирующего ледника
<b>Ледниково-подпрудные озера</b>	
Редкие айсберги на озере	- малоподвижный ледник
Множество айсбергов на озере	- активный ледник
Возникновение озер на языке ледника	- деградация ледника, оледенения

Когда информация однозначна, в правой части таблицы можно видеть один ответ, при неоднозначном ответе в правой части таблицы имеется два или более ответов. Как видим, информативными являются как сами **ВДС** ледников и их элементы, так и элементы поверхностной дренажной системы (русловая

сеть, устья ледниковых колодцев, ледниковые гроты, ледниковые озера, холмистый рельеф на поверхности ледника и др.).

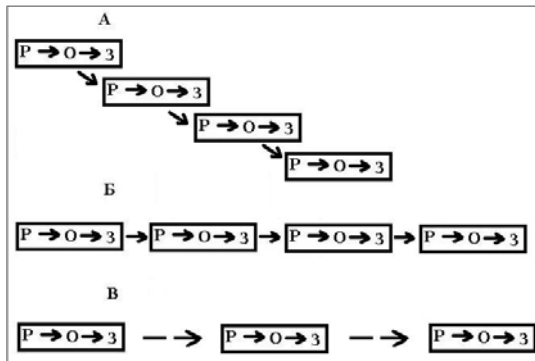


Рис. 6.8. Схема возникновения и умирания колодцев на ледниках: А – каскадная схема (колодцы меняют местоположение во времени в пределах одной зоны), показывает неравномерное движение ледника; Б – линейная схема (следующий колодец возникает на одном и том же месте после перемещения льда), показывает положение уступа на ложе ледника; В – пунктирная схема (колодцы меняют местоположение во времени и пространстве произвольно), показывает отсутствие установившейся структуры **ВДС**. В каждом прямоугольнике показан путь эволюции ледникового колодца: **Р** – рождение, **О** – отмирание, **З** – зарастание льдом; стрелки – пути эволюции колодцев.

### 6.2.2. Получение информации при дистанционном изучении ледников

Состояние изученности ледникового дренажа дает возможность использовать его при дистанционных исследованиях ледников для оценки их состояния. Использование аэрофото- и космических материалов позволяет при этом получать дополнительную информацию.

Поскольку дренажные системы ледников представляют совокупность взаимосвязанных частей, то часто по характеру развития одной из составляющих можно с большой долей вероятности судить о состоянии других составляющих системы дренажа ледника. Например, по характеру развития поверхностной системы дренажа часто можно судить о наличии и состоянии **ВДС**.

Дистанционные признаки, по которым можно узнать о состоянии ледника, сведены в Таблицу 6.2.

Картина расположения наледниковых озер показывает состояние ледникового льда. Если на языке ледника много мелких озер, то это зрелая стадия «ледникового карста», в дальнейшем видимо произойдет объединение нескольких озер, разрастание площади и слияние их в одно озеро. Наличие озер показывает отсутствие или слабое движение льда (часто после быстрых подвижек). Наличие крупного морено-подпружного озера – это очень вероятный показатель быстрых подвижек ледника (пульсаций).

Увеличение числа активных колодцев говорит об уменьшении скорости движения ледника [385].

## Дистанционные признаки дренажных систем ледников

Характеристика	Информация
<b>Водотоки на поверхности ледника:</b>	
Разрежение русловой сети во времени	- похолодание климата
Загущение русловой сети во времени	- потепление климата
Стабильная картина русловой сети	- ледник в стадии деградации
Отсутствие гидросети из-за огромного числа трещин	- ледник во время подвижки
Петельчатый рисунок русловой сети	- ледник после пульсации
<b>Колодцы:</b>	
Рост числа колодцев	- потепление климата - активизация ледника
Стабилизация крупных колодцев	- замедление активности ледника - потепление климата
Увеличение площадей водосборов колодцев	- потепление климата
<b>Наледи:</b>	
Уменьшение размеров наледей	- похолодание климата - уменьшение толщины теплой зоны ледника (маломощный, неактивный ледник)
Увеличение размеров наледей	- рост числа внутри и подледных емкостей воды (потепление климата; малоактивный ледник) - увеличение толщины теплой зоны ледника
<b>Наледниковые озера</b>	
Большое число мелких озер по всей поверхности ледника	- ледник после пульсации
<b>Приледниковый рельеф</b>	
Подвижный холмистый рельеф с большим количеством котловин и озер	- мертвый лед в ядре морены

Наледи у ледников полярных районов – показатели наличия каналов **ВДС**; рост площадей наледей – развитие сети **ВДС** и отепление ледника; уменьшение площадей наледей – сокращение сети **ВДС** и охлаждение ледника. Выявление характера изменения отдельных черт поверхностного дренажа и **ВДС** ледников позволяют картировать изменения климата [113, 357].

Мы надеемся, что дальнейшие исследования позволят дополнить количество дистанционных признаков, приведенных в таблице 6.2.

Все приведенные выше данные показывают, что исследование внутренней и поверхностной дренажных систем ледников позволяют получить большой объем дополнительной информации, как о состоянии ледника, так и о внешнем климате. Все это дает возможность говорить о хороших перспективах проведения мониторинга дренажных систем ледников.

### 6.3. Обоснование системы мониторинга дренажных систем

Таким образом, в современных условиях быстро меняющегося климата существует возможность создания системы мониторинга, который будет отражать состояние гидрологических систем ледников. Мониторинг может осу-



ществляться на основе периодического изучения строения дренажных систем в одних и тех же точках. Проведение такого мониторинга особенно важно в густо населенных районах, где перед наукой ставится задача сведения к минимуму губительных последствий природных катастроф. Осуществляемые в настоящее время научные программы проводят слежение за балансом массы и колебаниями положений краевых частей ледников, что позволяет оценить только внешние признаки деградации современного оледенения. Но, как говорилось выше, существует возможность оценивать состояние ледников по изменению их гидрологических систем и гидрологического режима.

Интерпретация полученных результатов должна проводиться с точки зрения глобальных климатических изменений. Поскольку основные изменения происходят на поверхности и внутри ледников, проведение этих работ требует определенных усилий и подготовки, но не требует больших материальных затрат.

Примером осуществления мониторинга дренажных систем ледников могут служить работы, проведенные нами на леднике Альдегонда (Шпицберген) в 2001-2004 гг. [113, 357]. Выполнение работ в полярном регионе было обусловлено тем, что дренажные системы полярных ледников наиболее быстро и четко реагирует на изменения климата, и именно поэтому являются хорошим индикатором этих изменений. Разработанная система мониторинга за изменениями элементов дренажной сети ледников позволила получить информацию о состоянии ледника и о тенденциях изменения климата. Основные признаки изменений состояния ледника и изменений климата, обнаруженные по состоянию и изменению элементов дренажной сети этого и соседних с ним ледников, представлены в таблицах 6.1 и 6.2.

Наши исследования показали, что мониторинг дренажных систем ледников может быть проведен и на других ледниках полярных регионов. При этом объекты мониторинга несколько разнятся при прямых и дистанционных исследованиях. При прямых исследованиях дренажных систем ледников объектами мониторинга являются: 1) русловая сеть; 2) приледниковые наледы; 3) полоса болот; 4) снеговая граница; 5) ледниковые озера; 6) устья ледниковых колодцев; 7) каналы **ВДС**; 8) сток с ледника; 9) химия стока; 10) колебания уровня воды в ледниковых колодцах; 11) поверхностная абляция. Дистанционные исследования дренажных систем ледников подразумевают исследования: 1) русловой сети на поверхности ледников; 2) приледниковых наледей; в) полосы болот; г) снеговые границы; д) ледниковые озера; е) устья ледниковых колодцев.

Среди способов проведения мониторинга дренажных систем ледников можно выделить: а) аэровизуальные наблюдения; анализ аэрофотоснимков и космоснимков; б) гляциологические исследования (прослеживание границ, измерения интенсивности абляции, баланса массы льда и др.); в) гидрологические исследования (изучение поверхностной гидрографии ледников, колебаний размеров жидкого стока, химизма и др.); г) спелеологические исследования (изучение **ВДС** ледников и их элементов изнутри). Метод прямых исследований наиболее информативен, но дистанционный метод мониторинга дренажных систем ледников менее трудоемок; он позволяет охватывать большие площади наблюдений и одновременно большое количество ледников (это так называемый «площадной мониторинг»). Наличие аэро- и космо-фотоснимков

разных лет позволяет отследить динамику изменений: водотоков на поверхности ледников, положения ледниковых колодцев и наледей, динамику снежных болот, областей наложенного льда и изменение высоты снеговой линии («временной мониторинг»).

Нами предлагаются следующие этапы проведения мониторинга дренажных систем ледников:

I этап – сбор информации на основании полевых и камеральных работ;

II этап – проведение анализа полученных результатов: выявление динамики процессов, происходящих на поверхности и внутри ледника: а) ежегодные изменения наледей; б) динамика русловой сети, каналов **ВДС** и т.д.

III этап – выявление всевозможных взаимосвязей: изменения поверхностных дренажных систем в зависимости от вариации климатических показателей района исследования, изменения поверхностных дренажных систем в соответствии с трансформацией внутренних дренажных систем и т.д.

IV этап – проведение оценки современного состояния, тренда развития и прогноза развития конкретных ледников и оледенения исследуемого района в будущем.

В заключение необходимо добавить, что ледники многих регионов земного шара (тропического, умеренного и полярного поясов) в настоящее время интенсивно деградируют, в результате чего может быть безвозвратно потеряна уникальная информация об их **ВДС** и внутренней жизни самих ледников, которая уже никогда не повторится. Это требует скорейшего внедрения методов мониторинга дренажных систем ледников в гляциологическую практику.

#### 6.4. Необходимость изучения **ВДС**

Изучение **ВДС** ледников является необходимым звеном исследований нивально-гляциальных систем [70].

**ВДС** обладает комплексным воздействием на ледники. Изучение **ВДС** показало, что их присутствие в ледниках кардинально меняет физические свойства льда, его проницаемость для воды, структуру и химизм ледникового стока, характер перемещения наносов водными потоками, отдельные характеристики ледников: поле напряжений в толще льда, расположение водоносного горизонта в разных частях ледников, изменение толщины слоя холодного льда за счет отепление льда вокруг каналов **ВДС**, являются побудительной причиной многочисленных явлений в ледниках: выбросы воды, зимний сток, изменение скорости движения, быстрые подвижки, ускоренная дегляциация. На некоторых этапах жизни ледников (в частности в период дегляциации) **ВДС** начинают контролировать практически все процессы в толще льда и многие процессы на поверхности ледников, становятся определяющим фактором их развития.

Без учета воздействия **ВДС** на ледники возможны ошибки в гидрологических расчетах, моделировании гидрологических процессов в ледниках, интерпретации результатов большинства косвенных методов изучения **ВДС** (окрашивания вод, изучения стока, определения времени добегающего, химизма стока, стока взвешенных наносов, глубины расположения слоя теплого льда, величины содержания воды во льду и др.).

Если нам неизвестно строение **ВДС** становится непонятным, как вода движется в толще льда. Если мы не будем изучать **ВДС**, то 1) внутренняя часть

ледников останется для нас «черным ящиком»; 2) безвозвратно потеряем ценную научную информацию о характере разрушения ледников изнутри; 3) не будем понимать процессы, происходящие в ледниках.

#### **6.4.1. Примеры применения исследований ВДС в гляциологии**

##### *Пульсирующие ледники*

Пульсирующие ледники наиболее широко развиты на архипелаге Шпицберген [331, 426]. Имеются они как среди горных, так и горно-покровных и покровных ледников. По предварительным оценкам, около 90% ледников архипелага относятся к пульсирующим [262, 327]. Но есть они и в других регионах [362, 387, 448 и др.]. К 1990-м гг. пульсации были зарегистрированы примерно на 100 ледниках архипелага Шпицберген [216, 327], т.е. примерно для 5% от известного на архипелаге числа ледников или около 10% от количества крупных ледников. К 2000 г. данные о подвижках были собраны для 146 ледников или около 13% от числа крупных ледников Шпицбергена [312]. Статистический анализ связывает пульсации ледников с их термическим режимом и протяженностью [216, 312]. Пульсирующие ледники характеризуются тем, что для них типичны резкие подвижки, которые происходят через определенные периоды времени (от 15 лет и более). После подвижки поверхность ледника бывает обычно сильно раздроблена, а языковая часть ледника становится неподвижной. Это способствует быстрой деградации языков ледников после пульсаций. Таким образом, если мы видим наступающие ледники, значит, они находятся, скорее всего, в стадии подвижки, а если ледники отступают, они пребывают в стадии стабилизации после подвижки или это горно-долинные ледники.

Автор проводил изучение пульсирующего ледника Фритьюф в 2002-2004 гг. (аэровизуальные и наземные исследования). Было проанализировано состояние поверхности ледника, характер ее изменения после подвижки 1996 г., степень распространения трещин, зафиксировано положение языка ледника, местоположения ледниковых колодцев, приледниковых озер, котловин и поверхностных водотоков. На основании изучения рельефа поверхности этого ледника нам удалось выделить новый, ранее неизвестный для Шпицбергена дешифровочный признак, характерный для пульсирующих ледников. Было обнаружено, что на стадии залечивания трещин после пульсации для поверхности ледника типичен своеобразный петельчатый рисунок поверхностной гидрологической сети и большое количество мелких озер, что оказалось типичным и для других пульсирующих ледников архипелага. Обнаружение этого дешифровочного признака помогает выявлять пульсирующие ледники в тех случаях, когда другие признаки подвижки ледника не обнаруживаются. Оказалось, что возможность использования воронок на поверхности ледника в качестве признака пульсирующих ледников рассматривалась и раньше на примере других регионов [448]. Но к однозначному ответу авторы придти не смогли.

Для составления «Карты оледенения архипелага Шпицберген и прилегающего к нему шельфа (Губернаторство Свальбард, Норвегия)» масштаба 1:1000000 (не издана) автор в 2003 г. провел дешифрирование аэрофотоснимков масштаба 1:50000 по залетам 1990 г. на всю территорию архипелага (съемка Норвежского Полярного института), а также космофотоснимков 1997 и 2001 гг. При дешифрировании аэрофотоснимков удалось подтвердить при-

надлежность некоторых ледников к пульсирующим, а также выделить целый ряд новых пульсирующих ледников на архипелаге.

Пульсации были зарегистрированы на всех типах ледников от горно-долинных до выводных ледников горно-покровного и покровного оледенения. Оказалось, что подавляющее большинство выводных ледников как горно-покровного, так и покровного оледенения оказались пульсирующими (Рис. 6.9).

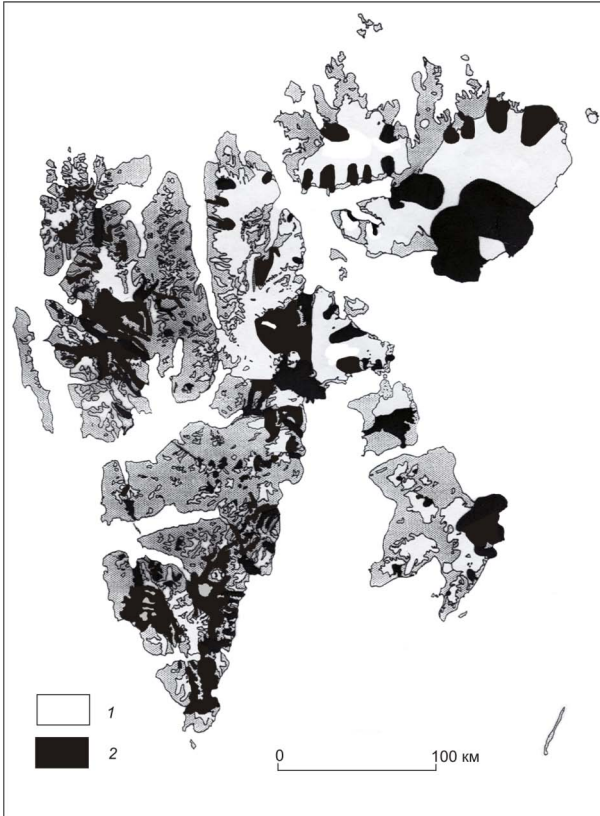


Рис. 6.9. Пульсирующие ледники Шпицбергена. Белое – ледники; черное – пульсирующие ледники, серое – территории, свободные ото льда (по данным автора и работ [216, 272, 312, 327, 331]).

Из сказанного выше вытекает вывод, что пульсации ледников это действительно массовое явление на Шпицбергене.

Выделение пульсирующих ледников по характеру развития «ледникового карста» при анализе аэрофотоснимков является наглядным примером использования дистанционных методов для определения состояния ледников.

#### *Политермальные ледники*

**ВДС** политермальных ледников изучены очень слабо. Исследованы только отдельные элементы **ВДС** некоторых ледников [259, 398, 402 и др.]. А вот представления об общей системе дренажа таких ледников отсутствует. На основании исследований, проведенных нами на политермальных ледниках архи-

пелага Шпицберген нам удалось построить концептуальную модель дренажа, как отдельного ледника, так и политермальных ледников в целом.

### **ВДС** ледника Альдегонда

**ВДС** ледника Альдегонда устроена довольно сложно [100, 106, 108, 112, 359]. Строение **ВДС** ледника и ее элементов рассмотрено более подробно в главах 3 и 4.

В процессе многолетних исследований нам не удалось найти соединений отдельных ледниковых шахт между собой, за исключением случая, когда это происходило вблизи основания или в середине ствола входного колодца. Поэтому картина строения дренажа под всем ледником до сих пор остается неизвестной. Поскольку наиболее устойчивы к действию пластической деформации льда каналы, которые расположены в основании слоя холодного льда (с понижением температуры пластичность льда падает [306]), то можно предположить, что основные дрены расположены по краям ледника, где толщина холодного слоя льда сравнима с толщиной ледника. Толщина льда ледника Альдегонда позволяет проходить такому каналу вдоль правого борта ледника, что было подтверждено направлением развития галерей ледниковой шахты у правого борта, а также геофизическими исследованиями [11]. У левого борта ледника толщины льда едва хватает для формирования продольного левого маргинального канала. Выход ледниковых колодцев в прозрачный лед подтверждает близость ложа. Существование маргинального канала подтверждается направлением развития галерей ледниковых шахт в левой и средней частях ледника, которые ориентированы на север (к краю ледника). Тем не менее, в дальнейшем через несколько сотен метров подледному каналу, вероятно, придется пойти поперек ледника и соединиться с каналом, расположенным у правого борта ледника, что обусловлено строением ледникового ложа. (Рис. 6.10).

Как при этом произойдет переброска воды к северному краю языка ледника, где отмечен основной выход подледниковых вод, не вполне понятно. Однако с уверенностью можно говорить, что сток под ледником происходит по отдельным каналам, а не имеет площадного характера, что было доказано и геофизическими исследованиями [11].

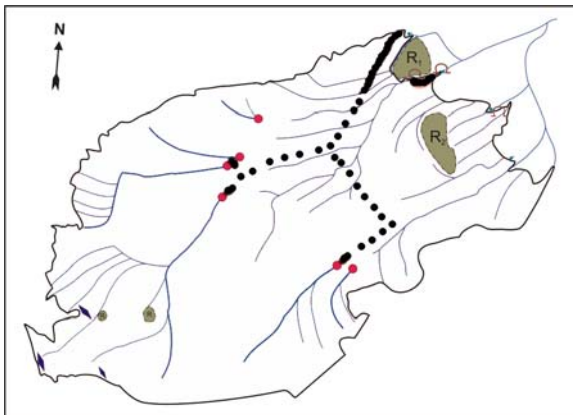


Рис. 6.10. План ледника Альдегонда (Шпицберген). Серые круги – ледниковые колодцы. Черные сплошные линии – исследованные участки каналов **ВДС**, пунктирные – предполагаемые каналы.

### *Особенности внутреннего дренажа политермальных ледников*

Наши исследования на других ледниках архипелага, а также исследования других авторов [226, 467 и др.] показали, что **ВДС** имеет примерно одинаковое строение и структуру на всех политермальных ледниках. При этом не имеют большого значения длина ледника, его тип (горно-долинный или выводной), ориентация по сторонам света и высотное положение языка.

Общими закономерностями строения **ВДС** политермальных ледников являются:

1) расположение каналов зоны транзита **ВДС** в нижней части слоя холодного льда. Чем толще слой холодного льда характерен для ледника, тем глубже во льду располагаются дренажные каналы и тем больше будет глубина входных колодцев в ледниковые шахты. Если для ледника Альдегонда (Шпицберген) входные колодцы имеют глубину, как правило, равную 50-80 м, то для ледника Ханс (Шпицберген) входные колодцы достигают 90-100 м глубины [226]. А для ледника Стор (Швеция), где толщина слоя холодного льда имеет величину около 30 м, глубина входных колодцев в ледниковые шахты также колеблется около этой величины [444].

2) Формирование входных колодцев в ледниковые шахты происходит по трещинам. Именно с этим связано вертикальное расположение стволов колодцев и их большая глубина. Более мелкие колодцы, которые не пробивают основной толщины слоя холодного льда, не имеют больших шансов на выживание, так как каналы внутри слоя холодного льда гораздо быстрее заполняются вторичным льдом, чем более крупные и более глубокие каналы.

3) Выходы воды из **ВДС** многих политермальных ледников осуществляется по субгоризонтальным трещинам. Этот тип каналов был обнаружен нами в 2001 г. [356]. Подобные каналы и трещины были обнаружены на ледниках: Западный Гренфиорд, Фритъёф, Тавле, Оватсмарк, Элиз (Шпицберген), а также на леднике Иныльчек (Тянь-Шань). Это значит, что сток через такие трещины является широко распространенным явлением на политермальных ледниках.

4) Некоторые внутриледные каналы на политермальных ледниках возникли при врезании русел водотоков в лед со скоростью, превышающей интенсивность поверхностной абляции. В результате, захоронения ледяных каньонов и возникли пещерные каналы внутри ледяной толщи. Подобное явление было отмечено для ледников: Вереншельда [226], Тавле, Лонгиер, Оватсмарк (Шпицберген).

Рассмотрим вопрос о формировании **ВДС** в политермальных ледниках. На основании наших исследований по изучению структуры каналов **ВДС** в политермальных ледниках архипелага и материалов, полученных другими авторами, можно предложить два основных сценария формирования **ВДС** для этого типа ледников.

**А)** Вода попадает в толщу льда через трещины и проникает к основанию холодного слоя или ложу ледника. Возможно, первично это происходило вблизи края ледника, где толщина льда примерно равна толщине слоя холодного льда и вода по трещинам попадает сразу же на ложе ледника. Здесь каналы могут существовать дольше, чем в центральных частях ледника подо льдом, где им проще оказаться сомкнутыми пластической деформацией льда. Можно предположить, что именно краевые каналы в основании холодного ледяного слоя и являются основными дренами внутреннего стока, а каналы из других

частей ледника являются их притоками. Вероятно, аналогичная картина наблюдается и на выводных ледниках. Чем меньше будет толщина ледника, и чем ближе она будет приближаться к толщине слоя холодного льда, тем сильнее будет нарушаться такая идеализированная картина двух основных каналов сброса воды внутри политермальных ледников.

Что касается объединения отдельных каналов, то оно будет происходить или ниже слоя холодного льда или в его основании, а новые каналы будут формироваться по вертикальным трещинам, которые могут пронизывать слой холодного льда насквозь. При этом соединении новых каналов с существующей **ВДС** будет проходить по системе трещин по принципу сообщающихся сосудов. Сброс воды из теплого ядра **ВДС** политермальных ледников может происходить либо по маргинальной системе дренажа (выводные ледники) или по субгоризонтальным трещинам в основании ледяной толщи. Как формируются такие трещины пока не вполне понятно, но возможно это связано с микроподвижками льда в начале лета, когда давление воды внутри толщи политермального ледника достигает максимальных значений. Тем более что, возникнув раз, такие трещины заполняются русловыми отложениями, что облегчает в дальнейшем их возобновление, способствуя выходу воды из ледника.

**Б)** Каналы в толще льда возникают при врезании поверхностных водотоков (Рис. 4.6Б-б) с последующим их захоронением. Этот способ формирования **ВДС** ледников возможен только на теоретическом уровне, так как при большой толщине льда над каналом достаточно одного небольшого дефекта в системе (например, сужения канала) и она будет закупорена и отомрет. Поэтому таким путем вероятно образование поверхностных каньонов, которые обычно имеют глубину до 15 м, но вполне возможны каньоны и до 20 м глубиной, очень редко – более. Все проблемы со стоком через такие каналы начинаются после их запечатывания снегом и льдом, когда воде остается единственный путь движения внутри ледника. Таким путем могут возникать небольшие, как правило, маргинальные внутренние системы дренажа в холодных и краевых частях политермальных ледников (как на леднике Лонгиер, Шпицберген). Случаи формирования центральных каналов **ВДС** таким путем пока не известны.

**В)** Все также как в типе **А**, но присоединение отдельных участков **ВДС** происходит по принципу **Б**, то есть врезанием канала с поверхности (Рис. 4.6Б-в). Скорее всего, это возможно только на ледниках с довольно большими уклонами поверхности (5-10° и более), как это наблюдалось на ледниках Тавле и Лонгиер (Шпицберген). В обоих случаях отмечался врез канала на глубину 15-30 м. Это возможно только потому, что интенсивность врезания канала в этом случае должна существенно превышать поверхностную абляцию, что согласуется с расчетами [284]. По-видимому, этот случай, хотя и возможен, но достаточно редок.

Как видим, знание структуры и эволюции **ВДС** в ледниках позволяет решать и такие слабоизученные вопросы как выявление механизмов формирования дренажа политермальных ледников.

### **ВДС** и радиоэхозондирование

Радиоэхозондирование ледников позволяет определять не только положение ложа ледников, границы между теплым и холодным слоем льда политермических ледников, но и содержание воды в нем [120, 146, 342, 380, 382 и др.]. При

этом наблюдения могут проводиться как в одной точке, так и по профилям, что позволяет выносить полученные данные на площадь, т.е. составлять карты.

Однако использование только одних геофизических методов для исследования строения ледников порой может дать не очень точные результаты. Дело в том, что радарные исследования позволяют получить внутренние отражения в ледяной толще, а интерпретировать эти отражения можно порой по-разному. В качестве примера можно привести геофизические исследования ледника Шокальского на Новой Земле в 2004 г. На леднике были проведены радиолокационные исследования, по результатам которых было сделано заключение, что этот ледник является холодным (Ю.Я. Мачерет, 2004, устное сообщение). Однако предыдущие исследования показали наличие теплой фирновой зоны в верхней части зоны аккумуляции ледника, тогда же было выявлено присутствие ледниковых колодцев в средней части ледника, а также был обнаружен зимний сток с ледника [152]. Первый факт говорит о возможной политермальности ледника, в то время как два последних факта однозначно указывают, что ледник является политермальным.

Полученная разница строения температурного поля ледника Шокальского по геофизическим данным и по данным о структуре **ВДС** может быть объяснена несколькими причинами. Во-первых, за время, прошедшее с гляциологических исследований на Новой Земле прошло более 40 лет, и за это время слой теплого льда в основании ледника мог исчезнуть. Во-вторых, толщина слоя теплого льда могла быть столь небольшой и он мог быть насыщен моренным материалом, что геофизические методы не смогли обнаружить этот слой. Чтобы выяснить истинное положение вещей, необходимо проведение дополнительных исследований.

В любом случае, этот пример показывает, что совместное использование нескольких методов изучения ледников и их **ВДС** может дать гораздо больше информации, чем каждый из этих методов по отдельности.

### *Несколько слов о моделях **ВДС***

В последнее время для гидрологического прогноза положения поверхностных и внутренних дренажных систем в теплых и политермальных ледниках используются математические модели рельефа (DEM – digital elevation model). Модель для ледника строится на том основании, что нам известны рельеф поверхности ледника и его ложа (по данным радиозондирования ледника), а также расчета положения пьезометрической поверхности в толще ледника. По точкам сетки на поверхности ледника строится карта пьезометрической поверхности [439], которая позволяет по получившемуся внутриледному рельефу построить расположение основных внутриледных или подледных дрен, т.е. каналов **ВДС** [228]. Такие модели построены уже для нескольких ледников: Дрен [273], Ханс, Вереншольда [380], Средний Ловен [407] на Шпицбергене, Трапридж на Аляске [232], Д'Арола в Альпах [433] и для некоторых других ледников.

Основное допущение этой модели строится на том, что давление воды в толще льда является одинаковым по всей площади ледника. Обычно в используемых моделях принимается и рассчитывается несколько вариантов значения давления воды в толще льда: 1) когда оно равно давлению вышележащего льда ( $K=1$ ); 2) когда оно равно 0,5 давления вышележащего льда ( $K=0,5$ ); 3) когда



оно не зависит от давления льда, т.е. вода движется при атмосферном давлении ( $K=0$ ) и контролируется рельефом ложа ледника (Рис. 6.11).

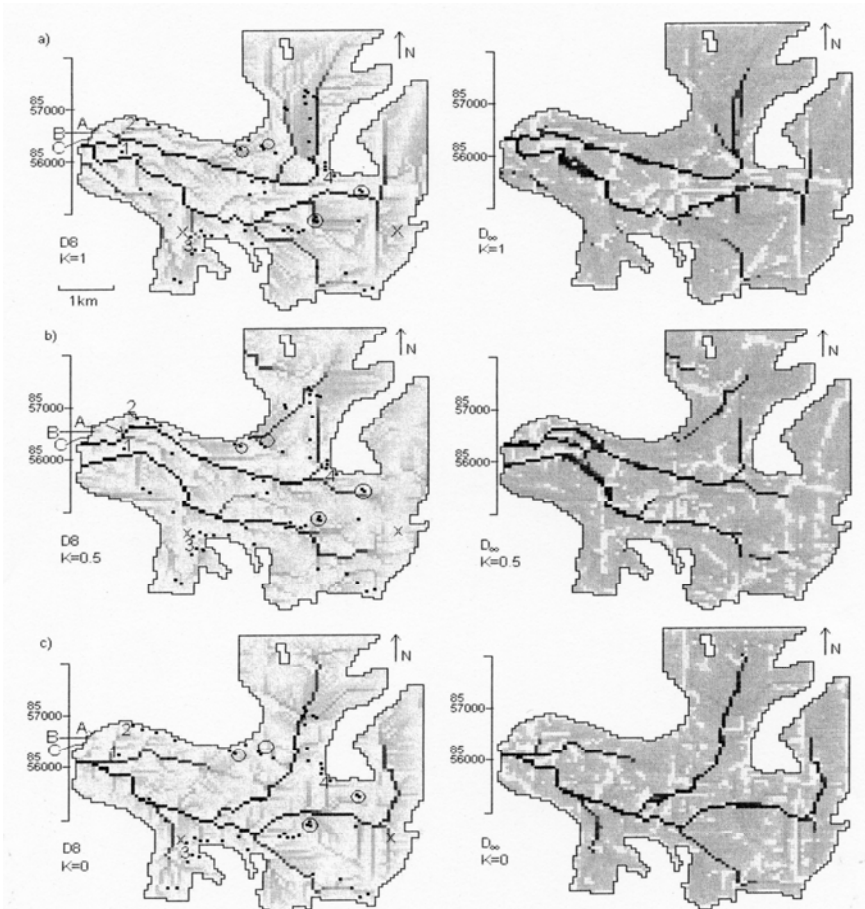


Рис. 6.11. Карты дренажа ледника Вереншельда, построенные с использованием DEM моделей. а)  $K=1$ , D8 – карта направлений течения и объемов стока,  $D_{\infty}$  – карта главных водосборных бассейнов.; б)  $K=0,5$  D8 – карта направлений течения и объемов стока,  $D_{\infty}$  – карта главных водосборных бассейнов.; в)  $K=0$  D8 – карта направлений течения и объемов стока,  $D_{\infty}$  – карта главных водосборных бассейнов. Черными квадратами показаны ледниковые колодцы. Кругами показаны депрессии «ледникового карста». А, В, С – реальные выходы воды на языке ледника [380].

Анализ результатов моделирования и сравнение полученных расчетным путем каналов **ВДС** с известными на этих ледниках реальными каналами **ВДС** показало лишь частичное совпадение реальных каналов с теоретическими [380]. То есть в действительности, модель может дать только тенденцию развития внутреннего дренажа ледника. При этом модель не способна правильно показать положения выхода воды из ледника. Впрочем, тенденции развития

каналов **ВДС** внутри ледников можно получать из общих соображений, и, не прибегая к столь трудоемкому, но очень модному в настоящее время моделированию.

На основании изучения структуры и эволюции **ВДС** в ледниках мы можем выделить следующие методические ошибки, которые имеются при построении такого типа моделей:

1) модели основываются на неверном (устаревшем) представлении о положении пьезометрического уровня в пределах ледников. Ни на одном из известных ледников пьезометрическая поверхность не располагается равномерно по всему леднику и давление во всех точках ледника не имеет одинаковой пропорции по отношению к толщине ледника, что подтверждается многочисленными исследованиями [409, 444 и др.]. Наши исследования **ВДС**, а также результаты других исследований говорят о неравномерном залегании уровня грунтовых вод в пределах ледников и о его значительных не всегда регулярных колебаниях [385, 423 и др.].

2) Разное время изготовления карт поверхности и ложа, которое не совпадает со временем исследований каналов **ВДС**. Так, в работе [380] рассматриваются каналы **ВДС**, исследованные в конце 1980-х и в начале 1990-х гг. Как было показано выше, строение **ВДС** сильно меняется в течение всего нескольких лет. Это наблюдалось на всех исследованных ледниках [402, 423 и др.]. Значит, данные 15-20 летней давности не могут быть использованы в качестве обоснования правильности моделей.

3) Кроме того, то обстоятельство, что трансформация строения **ВДС** обычно происходит на фоне слабо изменяющейся поверхности ледника, является дополнительным подтверждением неверности посылок используемых моделей. Например, на леднике Вереншольда (Шпицберген) положение выходов воды на языке ледника меняется ежегодно [398, 399]. А на леднике Энга (Норвегия), на котором происходит отбор воды с ложа ледника для электростанции, отмечено, что положения каналов под ледником изменилось в 1994 г. по сравнению с 1993 г. – канал сместился [188]. Аналогичные смещения канала под ледником Аржантьер (Альпы) неоднократно отмечались в процессе эксплуатации водозаборов, расположенных под ледником. Эти факты также подтверждают изменение положения канала без изменения формы ледника. Наши исследования на языке ледника Альдегонда (Шпицберген) показали, что активные пещеры на языке ледника могут сильно изменять свою форму и местоположение при его смещении в стороны по материнской субгоризонтальной трещине.

Для разрешения возникших противоречий следует, как нам кажется, перед построением моделей проводить комплексные работы, которые бы включали одновременно комплекс исследований, включая радиозондирование и карстологические (спелеологические) исследования.

#### 6.4.2. Перспективы исследований **ВДС**

Внутренность ледника – классический «черный ящик». Представление о структуре **ВДС** и самого ледника обычно получают только на основании дорогостоящего бурения, которое дает только точечную информацию, изучения режима стока с ледников или использования ряда косвенных методов (геофизические, гидрологические и др.). Напротив, исследования каналов **ВДС** по-

зволяют: а) путем измерений получить информацию *in situ* о путях движения воды в толще льда и под ним, об их размерах и строении; б) выяснить внутреннюю структуру ледника, закартировать крупные трещины, установить наличие и амплитуды перемещений по ним после образования полостей; в) отобрать образцы льда любого размера с нужной глубины для разных целей (определение проницаемости, прочности, водонасыщенности, определения структуры льда и др.); г) определить морфометрические характеристики каналов **ВДС**. Анализ и математическая обработка морфометрических параметров каналов **ВДС** позволяет получить статистически устойчивые параметры **ВДС** и пустотности отдельных ледников и их участков.

Анализ планов и разрезов отдельных полостей (элементов **ВДС**) позволяет определить главные направления тектонической трещиноватости и их связи с ориентировкой элипсоидов деформации в отдельных частях конкретных ледников, путем статистического анализа данных о длине прямолинейных участков каналов **ВДС** определить размеры и конфигурацию блоков льда, в котором заложена полость, установить густоту гидрологически активной трещиноватости внутри этих блоков.

Обычно гидрологические исследования возможны только в областях питания и разгрузки ледниковых вод. Применение карстологических (спелеологических) методов позволяет проводить гидрологические исследования и в области движения (транзита) подземных потоков, образующих крупные **ВДС**. Исследование их дают возможность:

А) выявить условия залегания водоносного горизонта (единый пьезометрический уровень, изолированные водотоки, «двойная пористость» с различными фильтрационными свойствами для трещинных зон и внутренних, слабо трещиноватых частей ледяных блоков, степень заполнения каналов водой).

Б) установить структурную и фильтрационную анизотропию ледника путем индикационных опытов.

В) установить характер движения воды (свободное, напорное, ламинарное – турбулентное) в различных частях **ВДС**, получить расчетные характеристики водных потоков внутри **ВДС** (скорость, уровень, расход, число Рейнольдса, Фруда, и пр.) и ледника в целом (коэффициент фильтрации и др.), расчленив гидрографы источников на языках ледников (с выделением мертвого объема, зарегулированного в подземных подпрудных и аккумулятивных озерах) и кривые истощения (с выделением различных составляющих ледникового стока).

Г) увязать сезонные изменения гидродинамических параметров и температуры ледниковых вод с материалами метео- и гидрологических наблюдений на поверхности, с изменениями расходов источников и колебаниями уровней воды в колодцах и скважинах.

Д) получить дифференциальные значения активности «карстового» процесса для разных сезонов и гидродинамических зон ледников.

Е) установить характер распределения температуры льда на разной глубине от поверхности ледника.

Ж) выявить характер распределения температуры воды на разных участках канала **ВДС**.

Изоморфизм ледникового и известнякового карста позволяет использовать достижения в исследовании одного из типов карста для выяснения закономерностей развития другого типа карста. Обширное развитие известняково-

го карста и распространение его на огромных территориях, в том числе широко используемых для разного рода хозяйственной деятельности (сельское хозяйство, строительство дорог и сооружений), привело к тому, что эта разновидность карста в настоящее время очень хорошо изучена. Это означает, что закономерности развития карста в известняках могут быть использованы для выяснения соответствующих закономерностей в «ледниковом карсте». Причем это «перенесение закономерностей» возможно на уровне системы, то есть без внесения серьезных поправок, а лишь с учетом особых свойств льда: текучести, пластичности и термического состояния. Это приводит сейчас и приведет в будущем к прогрессу в изучении **ВДС** ледников (от этапа зарождения каналов **ВДС** по трещинам, таяния льда на стенах каналов до развития и эволюции **ВДС** в целом). Но это означает также, что и многие закономерности, получаемые при изучении «ледникового карста», могут сейчас и смогут в будущем без очень серьезных изменений использоваться при исследованиях известнякового карста. Это особенно заманчиво из-за разной скорости протекания процессов и образования карстовых форм в известняках и во льду. Если на формирование карстовых форм в известняках требуется многие сотни тысяч лет, то на образование аналогичных форм во льду необходимо всего от нескольких месяцев до нескольких лет. Значит можно не только непосредственно наблюдать образование карстовых форм в ледниках разных регионов с разнообразным климатом, проводить точные измерения или даже искусственно ставить некоторые типы экспериментов, но и исследовать эволюцию **ВДС**. Это означает, что «ледниковый карст» может служить натурной моделью известнякового карста. И это сулит огромные перспективы в изучении известнякового карста в будущем. Конечно, ни сейчас, ни в будущем нельзя будет автоматически переносить закономерности образования отдельных форм с одного типа карста на другой. Но это в тоже время не означает, что этим вообще нельзя будет воспользоваться. Поэтому вполне правомочна надежда, что большой интерес, который возник в последнее время к изучению «ледникового карста», в будущем приведет к прогрессу и в изучении не только ледников, но и известнякового карста.

Изучение **ВДС** в будущем позволит получить количественные показатели роста и динамики полостей **ВДС** в ледниках разных типов и разных регионов. С помощью этих показателей в будущем, вероятно, удастся количественно оценить не только скорости возникновения и разрушения **ВДС**, но и роль **ВДС** на разных этапах жизни ледников.

Дальнейшее изучение **ВДС** даст возможность объяснить механизмы таких катастрофических ледниковых явлений, как прорывы ледниковых озер, быстрые подвижки льда. Детальное изучение **ВДС** позволит лучше разобраться в эволюции «ледникового карста», что даст возможность подойти к объяснению разрушения языков ледников, а также ледниковых покровов современных и древних оледенений с количественных позиций.

Исследование **ВДС** совместно с другими гляциологическими исследованиями позволит по-новому взглянуть на роль воды в жизни и эволюции ледников, что даст возможность объяснить как свойства льда, так и особенности поведения ледников (движение, метаморфизм, особенности деградации и др.).

Изучение дренажных систем ледников, закономерностей их образования и эволюции в течение сезона абляции и в многолетнем разрезе, а также в связи

с состоянием и строением ледников дает возможность увязать между собой соотношения поверхностных и внутренних дренажных систем ледников. Но оно позволяет также решать обратную задачу: на основе изучения дренажных систем судить о состоянии отдельных частей и целых ледников. Это даст возможность в будущем на основе изучения дренажных систем, в том числе и при помощи дистанционных методов, совместно с контролем за положением языков ледников в пространстве получить более полную, широкую и достоверную информацию не только о строении и состоянии многих ледников планеты, но и о тенденциях изменения климата, как на локальном, так и на глобальном уровне.