

А. И. Кузнецов

ВОСТОК – ДЕЛО ТОНКОЕ

Санкт-Петербург
2022

УДК 551.324.54(99)

На основании геофизических данных о строении антарктического ледника, рассмотрении теплофизических, механических, гидрофизических законов применительно к толще ледникового щита в книге представлена альтернативная точка зрения на строение и движение Антарктического ледникового покрова, которая не совпадает с общепринятой на сегодняшний день моделью и возможностью существования «озера Восток». В этой книге впервые представлен целостный взгляд на строение антарктического ледника. До сих пор данные о ледниковом покрове Антарктиды рассеяны по многочисленным статьям, написанным в основном на иностранных языках. Как указывает автор все его построения могут быть оспорены и не представляют истины в последней инстанции. Но рассуждения и споры необходимы для познания истины. Рассуждения автора приводят к постановке важной темы – дальнейшим направлениям изучения Антарктиды и окружающих ее морей. Будучи принятой в качестве конкретных задач по исследованию Антарктики, она может способствовать реальным научным прорывам в области наук о Земле.

А.И. Кузнецов

ВОСТОК – ДЕЛО ТОНКОЕ

Литературный редактор
Обложка

А.А. Дерман.
О.И. Панасенкова

Подписано в печать **.**.2022
Формат 70×100 1/16
Тираж ***

Печать цифровая
Усл. печ. л. 7,75
Заказ №

Типография издательства Политехнического университета Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Авторитет, основанный на мнении тысячи, в вопросах науки
не стоит искры разума у одного единственного.
Галилео Галилей (1564–1642)

Путешествие начинается с первого шага,
открытие начинается с вздорного на первый взгляд утверждения.
Олег Куваев. «Не споткнись о Полярный круг»

Переубедить можно только сомневающегося.
Где-то услышанное или прочитанное

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данной работе собраны воедино и всесторонне рассматриваются вопросы, связанные с Антарктидой, с его ледниковым покровом и частично затрагивающие подледниковые структуры. Казалось бы, об этом материке уже многое известно, существует масса публикаций, защищена масса кандидатских и докторских диссертаций, но все они, как правило, посвящены какому-то одному конкретному вопросу, а единой картины как-то не складывается. До сих пор не совсем ясно, как устроен ледниковый покров, какие процессы в нём происходят, как и за счёт чего он движется, существуют ли подледниковые озёра, как они могли образоваться? И таких вопросов пока ещё очень много, и ответы на них должны быть тесно взаимосвязаны между собой вследствие того, что тесно взаимосвязаны и процессы, происходящие в самом леднике Антарктиды. В последнее время это особенно актуально, так как эти процессы напрямую связаны с климатом на нашей планете, наблюдаемые сейчас изменения которого вызывают всеобщий интерес. Ответы на поставленные вопросы позволяют определить, существует ли на самом деле «озеро Восток» (здесь и далее это название буду заключать в кавычки, пока его существование не будет доказано практически как реально существующее природное образование), в котором мощность слоя жидкой воды более 1 000 м. Его открытие считается крупнейшим в XX веке, но не является ли это крупнейшим заблуждением XX века?

На сегодняшний день все высказывания о строении ледника, о процессах, которые в нём происходят, о наличии подледниковых «озёр» основываются на теоретических предположениях и на той или иной интерпретации геофизических данных. Сложилась уже определённая общепринятая модель строения ледникового покрова Антарктиды, в которой существуют эти подледниковые «озёра», а ледниковый покров движется по достаточно рельефному каменному основанию всей своей массой от внутриконтинентальных районов к побережью, постепенно увеличивая свою скорость, преодолевая на своём пути все встретившиеся препятствия в виде поднятий каменного основания. При этом он ещё по каким-то причинам меняет свою мощность, что хорошо заметно на радиолокационных разрезах. В связи с этим хочется, с одной стороны, задать авторам такой модели все эти вопросы, а с другой стороны, рассмотреть их в совокупности и проверить на соответствие законам и физики, а иногда просто здравому смыслу.

В первую очередь эти вопросы касаются ещё очень малоизученных до настоящего времени тепловых зависимостей на материке Антарктиды и в его ледниковом покрове, которые затрагивают и могут пояснить условия образования, существования и поведения жидкой воды под ним.

Если при определённом соотношении между тепловым потоком, мощностью ледника и разностью температур на поверхности и в его основании могут возникнуть благоприятные условия для таяния, а возможно, и замерзания нижней поверхности льда, то необходимо рассмотреть эти процессы более детально. Иногда в публикациях таяние нижней поверхности ледника для краткости называют «донным таянием»; такого определения можно придерживаться в дальнейшем, хотя оно в принципе неверно и будет подразумевать совсем другой процесс. Наличие жидкой воды под ледником уже подтверждено практически, поэтому важно рассмотреть, при каких чисто физических условиях может проходить процесс таяния льда и замерзания воды.

Следующие вопросы будут касаться уже поведения жидкой воды под ледником, которое должно подчиняться законам гидрофизики. В свою очередь, донное таяние и наличие жидкой воды подо льдом должно быть тесно связано с механическими процессами, происходящими в самом леднике, а именно с его вертикальным и горизонтальным движением. Процессы, происходящие в леднике, должны отражаться на его строении, которое может быть различно во внутриконтинентальных и прибрежных районах. В связи с этим будет важно рассмотреть и это.

Имеющиеся в распоряжении автора данные были получены в Восточной Антарктиде, поэтому их рассмотрение коснётся этой части материка. В ходе такого тщательного рассмотрения процессов, происходящих в леднике, непременно определится возможная геологическая природа и непосредственно «озера Восток».

Я попробовал в данной работе найти ответы на ряд этих вопросов, рассмотрев основные процессы, происходящие в леднике в Антарктиде, как раз с точки зрения законов физики. Не вдаваясь глубоко в теорию процессов и ограничившись элементарными зависимостями, я, на основе рассмотрения теплофизических, механических, гидрофизических законов и альтернативной интерпретации имеющихся в моём распоряжении геофизических данных, постарался составить альтернативную гипотезу строения ледника во внутриконтинентальных и прибрежных областях Антарктиды, которая практически не совпадает с общепринятой на сегодняшний день моделью, в которой существует «озеро Восток».

Предлагаемая в этой работе альтернативная модель строения ледникового покрова также пока предположительная, но всё же она опирается на соответствие основным законам физики и разработана на основе рассмотрения возможного хода тех теплофизических и механических процессов, которые могут происходить в леднике, нижележащем слое воды и каменном основании. Насколько она верна, могут показать время и специальные исследования, которые, надеюсь, когда-нибудь будут проведены.

Необходимо проверить и эту альтернативную модель на соответствие физическим законам, действующим в других районах Земли, если считать Антарктиду обычным её регионом. В противном случае, нужно будет признать, что этот район уникальный, либо здесь присутствуют какие-то вещества, которые нигде больше не встречаются или имеют какие-то специфические свойства.

Некоторые высказываемые в данной работе выводы уже были представлены автором в «Гипотезе о современном строении и состоянии ледникового покрова Антарктиды». Эта работа была рассмотрена, и ей был официально присвоен ста-

тус «Научной гипотезы», о чём имеется Авторское свидетельство за № 37-Н [23]. Данная, представляемая на суд читателей работа является естественным, более расширенным рассмотрением затрагиваемых там проблем.

Здесь будут приведены доказательства существования альтернативной модели, а подтверждения общепринятой пусть доказывают её приверженцы. Общепринятую в настоящее время, но большей частью основанную только на предположениях модель строения ледникового покрова Антарктиды можно найти в довольно большом количестве публикаций, и я не буду в данной работе на этом подробно останавливаться.

Рассмотрение процессов, происходящих в ледниковом покрове Восточной Антарктиды, в их совокупности, а они неизбежно связаны с изменениями климата на планете, будет важно для его дальнейшего изучения, возможно, могут иметь и какое-то практическое значение.

С историей открытия и изучения подледникового «озера Восток» как подледникового геологического образования и предполагаемой общепринятой моделью строения ледника в этом районе Восточной Антарктиды можно более подробно ознакомиться в Приложении 1.

Геофизические методы изучения ледникового покрова Антарктиды и возможная интерпретация получаемых ими данных приведены в Приложениях 2 и 3.

В конце работы в качестве выводов и рекомендаций рассматриваются основные задачи исследований, направленных на уточнение строения ледника Антарктиды и подлёдных геологических образований, а также методы их решения.

Выражаю благодарность всем тем, кто помогал в данной работе, особенно сотрудникам Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ) за поддержку и предоставленные материалы.

Выражаю особую благодарность ведущему научному сотруднику ГНЦ РФ ААНИИ, доктору географических наук Дмитрию Юрьевичу Большакову. Без его активного участия эта книга не была бы ни задумана, ни написана, ни издана

1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЛЕДНИКОВОМ ПОКРОВЕ АНТАРКТИДЫ

Рассматривая возможную модель строения ледникового покрова Антарктиды и те процессы, которые в нём происходят, нужно в первую очередь разобраться с теплофизическими процессами, происходящими в каменном основании, подлёдном слое воды и в самом леднике. Такие процессы, происходящие на всей Земле, должны соблюдаться и в Антарктиде. В связи с этим наибольший интерес для рассмотрения представляет район станции Восток, где благодаря бурению льда стали известны уже некоторые тепловые параметры ледника, которые могут служить основой той или иной геологической модели. Возможно, подробный анализ теплофизических процессов в этом районе Восточной Антарктиды позволит сделать какие-то обобщающие выводы, связанные с образованием и поведением жидкой воды под ледником, которые можно будет распространить и на другие районы Антарктиды.

Помимо рассмотрения теплофизических процессов непосредственно в районе станции Восток как наиболее изученного района Восточной Антарктиды, необходимо вообще определить, при каких условиях может находиться под ледником жидкая вода, как может происходить таяние нижней поверхности ледника и как это может быть связано с другими процессами, происходящими на этом материке.

В ходе рассмотрения и анализа необходимо будет найти ответы на ряд вопросов, связанных с тепловыми взаимодействиями:

1. Какова примерная величина теплового геотермального потока в районе станции Восток и возможно во всей Восточной Антарктиде, при котором возможно существование под ледником жидкой воды? Какой при этом может быть возможная величина такого слоя воды, исходя из теплофизических взаимодействий?

2. Каковы температурные соотношения и теплофизические свойства льда в ледниковом покрове в районе станции Восток в Восточной Антарктиде по имеющимся данным измерений температуры льда в скважине?

3. Отличаются ли в этом районе температурные соотношения в отдельных слоях льда?

4. Может ли существовать какая-то связь между тепловыми соотношениями в леднике и историей его формирования?

5. При каких реальных тепловых соотношениях в ледниковом покрове могут возникнуть благоприятные условия для донного таяния, а возможно, и замерзания нижней поверхности льда?

Прежде чем переходить непосредственно к рассмотрению тепловых параметров и к расчётам, необходимо сделать весьма важное замечание – тепловые параметры этого материка и свойства реального льда до настоящего времени всё ещё мало изучены, поэтому приводимые далее расчёты могут иметь приблизительный характер, но они не должны противоречить здравому смыслу и не должны сильно отличаться от справочных и тех реальных значений, которые могут быть получены в дальнейшем при натурных исследованиях.

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРимерной величины теплового потока в Антарктиде для дальнейшего рассмотрения

По сведениям, почерпнутым из публикаций и Интернета, источником тепла здесь и вообще на Земле является тепловой поток, идущий из её недр. Исследования показывают, что в среднем и для океанов, и для материков, и для Земли в целом

получаются одинаковые значения геотермального теплового потока — около 0,05—0,06 Вт/м², однако эта цифра не очень надёжна, так как большая часть поверхности Земли ещё не обследована. Для Антарктиды учёные часто принимают эти значения около 0,05 Вт/м² [15, 49, 50]. Видимо, эти значения теплового потока можно применять для дальнейших расчётов.

Для проверки, насколько поддерживаются в данном районе Антарктиды тепловые соотношения в леднике и подледниковой воде, воспользуемся известной в физике следующей тепловой зависимостью между количеством тепла, удельной теплопроводностью (λ) и температурным градиентом [22]:

$$Q = \lambda \left(\frac{\Delta T}{\Delta l} \right) S t, \quad (1.1)$$

где Q — количество теплоты, переданное слоем вещества толщиной Δl с площадью S при поддержании на его плоскостях разности температур ΔT за время t .

Данное соотношение позволяет при известном тепловом потоке и при определённой величине удельной теплопроводности вещества определить градиент передачи тепла, либо, зная величину градиента, можно определить удельную теплопроводность того или иного вещества, входящего в модель строения ледникового покрова и каменного основания. В свою очередь, градиент изменения температуры в слое позволяет определить либо разницу температур в его различных частях, либо мощность слоя вещества при такой разности температур. Если при расчётах получаемые значения будут близки к общепринятым, т.е. справочным, или не будут противоречить здравому смыслу, то рассчитанную модель можно будет считать в достаточной степени реальной.

Расчёт модели начнём снизу, т.е. с водного слоя, лежащего на каменном основании. В первую очередь попробуем из соотношения 1.1 определить, каким может быть тепловой градиент для слоя подледниковой воды, а из него уже возможную мощность этого слоя. Значение удельной теплопроводности для пресной воды для наших условий можно принять примерно равным 0,6 Вт·м⁻¹ °С⁻¹ [8]. Используя эти значения из соотношения 1.1, величина теплового градиента для подледниковой жидкой воды при значениях теплового потока 0,05—0,06 Вт/м² получается равным примерно 0,08—0,10 °С/м. Исходя из этих значений разность температур между каменным основанием и нижней поверхностью ледника для слоя воды 1 000 м должна быть равна 80—100 °С. Величина такого предполагаемого слоя воды в «озере Восток» взята из публикаций (см. Приложение 1). Из них также известно, что температура на нижней поверхности ледника равна около -3 °С [49], т.е. при мощности слоя воды 1 000 м температура каменного основания должна быть около 83—103 °С. Насколько это реально? На этот вопрос должны ответить приверженцы общепринятой гипотезы.

При предполагаемой мною мощности слоя воды около 100 м эти значения будут равны соответственно: разность температур 8—10 °С и температура каменного основания 11—13 °С. По моему мнению, эти цифры более реальны, т.е. предположение о наличии под ледником слоя жидкой воды величиной до первых сотен метров является достаточно реальным. Доказательства наличия такого слоя жидкой воды будем рассматривать в дальнейшем.

Отвечая на первый вопрос, поставленный в начале главы, можно принять величину геотермального теплового потока для Восточной Антарктиды равной примерно 0,05—0,06 Вт/м². Такой тепловой поток может обеспечить наличие слоя жидкой воды под ледником мощностью от нуля до первых сотен метров.

1.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ЛЕДНИКОВОМ ПОКРОВЕ В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК

В данном разделе попробуем определить, насколько то количество тепла, которое нами принято для данного района Антарктиды, будет соответствовать реальным тепловым процессам в самом леднике в районе станции Восток.

Исходя из законов физики количество тепла, подводимое к телу, должно в таком же количестве поступать в вышележащие слои геологической модели [20]. В нашем случае это геотермальное тепло, поддерживающее воду в жидком состоянии под ледником и подводимое к нижней поверхности ледника. Это тепло должно поддерживать и определённые температурные соотношения в самом леднике.

Благодаря бурению льда на станции Восток с определённой степенью достоверности стали известны некоторые тепловые параметры ледника в этом районе. Такие данные были опубликованы в статье Н.И. Баркова, Р.Н. Вострецова, В.Я. Липенкова и А.Н. Саламагина. (2002 г.) «Колебания температуры воздуха и осадков в районе станции Восток на протяжении четырех климатических циклов за последние 420 тыс. лет» [2]. К этой статье была приложена таблица температуры льда на различной глубине (табл. 1.1).

Из значений, приведённых в указанной выше таблице, можно определить среднюю величину градиента $\Delta T/\Delta l$ для всего слоя льда, в котором проводились измерения. По данным из таблицы на глубине 180 м температура составляет минус 56,652 °С, а на глубине 3612,6 м она равна минус 6,064 °С. Таким образом, температурный градиент для всего этого слоя льда здесь равен 50,588/3432,6, т.е. около 0,015 градуса на метр.

Для дальнейших расчётов тепловых параметров во льду в данном районе примем следующие начальные параметры: столб льда площадью 1 м², время 1 с, значение теплового потока 0,05—0,06 Вт/м². Из соотношения 1.1 при таком осреднённом градиенте получаем осреднённые значения удельной теплопроводности всего изученного слоя ледника от 3,39 до 4,07 Вт·м⁻¹ °С⁻¹.

Из общедоступных источников известно, что удельная теплопроводность пресного льда при нуле градусов равна 2,22 Вт·м⁻¹ °С⁻¹ и увеличивается с понижением температуры [3, 20]. Полученные нами значения отличаются от справочных, т.е. это может свидетельствовать либо о другом значении теплового потока, либо об изменении свойств реального льда относительно чистого, полученного из пресной воды. Попробуем рассмотреть и то и другое.

Имеется несколько выражений, описывающих зависимость изменения удельной теплопроводности пресного льда (λ) от температуры (T), одна из них приведена в работе [4]:

$$\lambda = 2,22 \cdot (1 - 0,0159T) \quad (1.2)$$

Чтобы проверить, насколько реальный лёд в этом районе подчиняется соотношению 1.2, подставим в него минимальную и максимальную температуры во льду, полученные при измерениях в скважине в данном районе. В этом случае удельная теплопроводность льда будет иметь значения 4,22 Вт·м⁻¹ °С⁻¹ при температуре минус 56,652 °С и 2,43 Вт·м⁻¹ °С⁻¹ при минус 6,064 °С. Эти значения несколько отличаются от тех, которые как осреднённые получены из выражения 1.1, но, тем не менее они близки значит, применение этих тепловых зависимостей для указанной ранее величины теплового потока вполне приемлемо. Конечно, необходимо учиты-

вать, что соотношения 1.1 и 1.2 относятся к чистому льду, а мы имеем здесь дело с реальным льдом, который может содержать примеси, и его реальные параметры могут отличаться от теоретических. В связи с этим приводимые здесь расчёты тепловых зависимостей очень приблизительны, но они, тем не менее, дают о них хотя бы общее представление.

Имея значение средней удельной теплопроводности для всего ледника равной $3,33 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, можно попробовать уточнить, при каком значении теплового потока оно может быть получено. Подставляя это значение средней удельной теплопроводности в соотношение 1.1, для осреднённого значения градиента, равного $0,015 \text{ град./м}$, будем иметь значение теплового потока примерно равного $0,0499 \text{ Вт/м}^2$, что довольно близко к значению взятому за основу для данного района Восточной Антарктиды.

Опять же — эти расчёты весьма приблизительны, но они получены по фактическим данным и не противоречат здравому смыслу, т.е. для дальнейших расчётов тепловых параметров вполне обоснованно можно принять величину теплового потока, равную $0,05 \text{ Вт/м}^2$, что согласуется с принимаемыми значениями для Антарктиды.

Таблица 1.1.

Результаты измерения температуры в скважине на станции Восток (21.12.1999 г.) [2]

Глубина, м	Температура, $^\circ\text{C}$						
180	-56,652	1060	-49,065	1940	-37,612	2817,5	-22,098
200	-56,509	1080	-48,829	1960	-37,297	2837,3	-21,717
220	-56,395	1100	-48,621	1980	-36,991	2857,2	-21,314
240	-56,269	1120	-48,393	2000	-36,664	2877,1	-20,932
260	-56,122	1140	-48,194	2020	-36,335	2897,0	-20,552
280	-55,968	1160	-47,949	2040	-36,024	2916,9	-20,163
300	-55,816	1180	-47,723	2060	-35,701	2936,7	-19,773
320	-55,675	1200	-47,503	2080	-35,387	2956,6	-19,363
340	-55,516	1220	-47,279	2100	-35,066	2976,5	-18,971
360	-55,365	1240	-47,070	2120	-34,732	2996,4	-18,575
380	-55,208	1260	-46,829	2140	-34,383	3016,3	-18,180
400	-55,043	1280	-46,574	2160	-34,070	3036,1	-17,783
420	-54,883	1300	-46,369	2180	-33,689	3056,0	-17,370
440	-54,718	1320	-46,145	2200	-33,350	3075,9	-16,982
460	-54,563	1340	-45,891	2220	-33,023	3095,8	-16,584
480	-54,397	1360	-45,629	2240	-32,726	3115,7	-16,179
500	-54,222	1380	-45,409	2260	-32,340	3135,5	-15,760
520	-54,057	1400	-45,163	2280	-31,984	3155,4	-15,396
540	-53,897	1420	-44,906	2300	-31,659	3175,3	-14,996
560	-53,741	1440	-44,648	2320	-31,314	3195,2	-14,618
580	-53,564	1460	-44,401	2340	-30,956	3215,0	-14,180
600	-53,397	1480	-44,151	2360	-30,608	3234,9	-13,807
620	-53,225	1500	-43,891	2380	-30,231	3254,8	-13,391
640	-53,050	1520	-43,615	2400	-29,884	3274,7	-12,974

Глубина, м	Температура, °С						
660	-52,880	1540	-43,350	2419,9	-29,510	3294,6	-12,580
680	-52,710	1560	-43,099	2439,8	-29,147	3314,4	-12,172
700	-52,529	1580	-42,842	2459,6	-28,783	3334,3	-11,767
720	-52,345	1600	-42,558	2479,5	-28,431	3354,2	-11,348
740	-52,166	1620	-42,285	2499,4	-28,060	3374,1	-10,954
760	-51,973	1640	-42,006	2519,3	-27,691	3394,0	-10,561
780	-51,802	1660	-41,742	2539,2	-27,325	3413,8	-10,140
800	-51,623	1680	-41,447	2559,0	-26,962	3433,7	-9,748
820	-51,416	1700	-41,167	2578,9	-26,595	3453,6	-9,333
840	-51,261	1720	-40,896	2598,8	-26,218	3473,5	-8,913
860	-51,062	1740	-40,615	2618,7	-25,856	3493,4	-8,497
880	-50,859	1760	-40,331	2638,6	-25,484	3513,2	-8,082
900	-50,665	1780	-40,041	2658,4	-25,108	3533,1	-7,681
920	-50,488	1800	-39,750	2678,3	-24,738	3553,0	-7,276
940	-50,268	1820	-39,447	2698,2	-24,345	3572,9	-6,884
960	-50,067	1840	-39,153	2718,1	-23,968	3592,8	-6,447
980	-49,864	1860	-38,828	2737,9	-23,600	3612,6	-6,064
1000	-49,658	1880	-38,542	2757,8	-23,221		
1020	-49,433	1900	-38,220	2777,7	-22,855		
1040	-49,249	1920	-37,924	2797,6	-22,462		

В следующем разделе при более детальном рассмотрении тепловых процессов в различных частях ледника, вероятно, можно будет определить, почему полученные ранее значения удельной теплопроводности льда для нижней и верхней частей ледника отличаются почти в два раза.

Проанализировав имеющиеся в нашем распоряжении натурные измерения температуры льда на различной глубине в скважине 5Г на станции Восток, можно сделать следующие выводы, которые будут ответами на второй вопрос главы, посвящённой рассмотрению тепловых процессов в ледниковом покрове в районе станции Восток:

1. Несмотря на отсутствие измеренных данных о температурах в верхней и нижней частях ледника, по имеющимся значениям вполне реально принимать величину теплового потока в данном районе равной $0,05 \text{ Вт/м}^2$. При такой величине теплового потока в леднике выдерживаются тепловые зависимости для всего ледника.

2. По имеющимся значениям температур теплофизические свойства льда здесь отличаются в верхней и нижней частях ледника, что, видимо, связано с различиями в их строении и составе.

1.3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ СЛОЁВ ЛЬДА В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК

В предыдущем разделе было определено, как соблюдаются тепловые соотношения во всём леднике в районе станции Восток, в котором производились измерения температуры в скважине. Теперь попробуем оценить, как тепловые зависимости

соблюдаются в отдельных слоях ледника. Для этого посчитаем теоретически, какие значения температур льда должны быть здесь с учётом имеющихся у нас данных о тепловом потоке, и сравним их со значениями реальных температур, измеренных в самом леднике. При таком анализе, возможно, будет замечена какая-то взаимосвязь тепловых процессов с историей накопления льда в данном районе Земли.

Как следует из опубликованной литературы, в которой рассматриваются вопросы теплофизических процессов во льду и в воде, для ледяного покрова озёр и рек характерно распределение коэффициента теплопроводности по его толщине [3]. Это обусловлено более высокой температурой льда в нижних слоях и низкой температурой в расположенных выше слоях, а также пористостью, которая в верхних слоях больше, чем в нижних (в нашем случае эта область совсем незначительна по отношению ко всей мощности ледника и можно её не рассматривать).

Проверим, имеют ли место изменения удельной теплопроводности в леднике Антарктиды вблизи станции Восток для отдельных слоёв ледника и подтверждаются ли они натурными измерениями. Сначала рассчитаем теоретически, как будут распределяться температуры в леднике с учётом соотношения 1.2.

Для теоретических расчётов разобьём ледниковый покров слоями по 20 м от 0 до 3 592,8 м (для лучшего сопоставления с измеренными значениями нижнюю часть ледника разобьём на те же интервалы, что и в таблице измеренных температур). На каждом таком интервале Δl определим, каким будет разница температур ΔT . Для этого воспользуемся приведённой в прошлом разделе зависимостью между количеством тепла, удельной теплопроводностью и температурным градиентом (см. зависимость 1.1). Для данного района изменения температуры с глубиной для каждого i -го интервала будем считать от температуры на поверхности ледника вниз. Примем её для лучшего совпадения с наблюдаемыми значениями равной минус 60 °С, что вполне соответствует реальным значениям для данного района Антарктиды. Температуру для верхней точки очередного $i+1$ -го интервала относительно предыдущего будем определять по формуле:

$$T_{i+1} = T_i + \Delta T \quad (1.3)$$

Знак + в формуле 1.3 говорит о том, что температура с глубиной будет повышаться. Определять ΔT будем по формуле для удельной теплопроводности, приведённой в разделе 1.1.2 с учётом приведённого выше соотношения 1.2:

$$\Delta T = \frac{\Delta l Q}{\lambda_0 (1 - 0,0159 T_i)} \quad (1.4)$$

Количество теплоты примем равным 0,05 Вт/м², коэффициент теплопроводности льда (λ_0) — 2,22 Вт·м⁻¹ °С⁻¹. На график изменений температуры с глубиной, полученный в результате теоретических расчётов, наложим значения из таблицы измеренных температур (см. табл. 1.1). Результат такого наложения приведён на рис. 1.1.

По характеру графика теоретически рассчитанных значений зависимости температуры от глубины можно сказать, что этот график практически прямолинеен, т.е. градиент по всей длине одинаковый, а температура передаётся равномерно. В то же время обращает на себя внимание то, что *градиент измеренных значений температуры* изменяется нелинейно, что выражается в изменении углов наклона кривой. Совпадения теоретически рассчитанных и измеренных значений в точках в нижних и верхних слоях льда говорят о том, что принятые нами значения теплового потока,

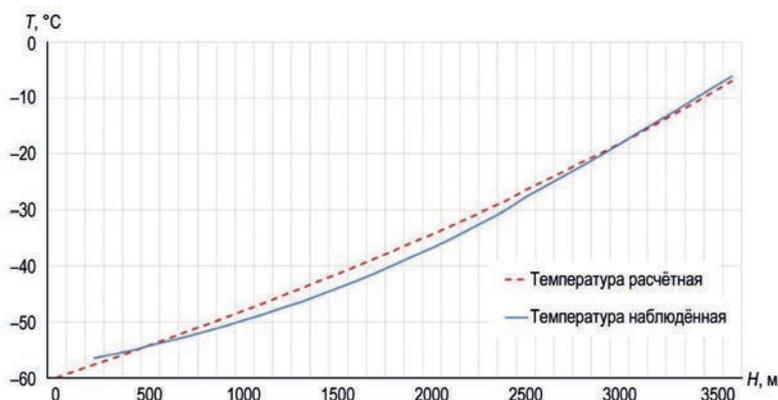


Рис. 1.1. Сопоставление теоретически рассчитанной и измеренной в скважине на станции Восток зависимости изменений температуры с глубиной

удельной теплопроводности льда и температуры на поверхности более или менее реальны для данного района Восточной Антарктиды.

Теоретически рассчитанные и измеренные значения температур расходятся на краях и в середине интервала измерений. Если у нас тепловой поток постоянный, а глубинные интервалы равномерны, то это говорит, видимо, об изменении значений удельной теплопроводности в отдельных слоях льда. Желательно понять, с чем это может быть связано. По-видимому, это может объясняться изменением физических свойств льда, что, в свою очередь, вероятно, связано с изменением условий накопления слоёв льда с течением времени в ходе оледенения. Эти выводы могут быть ответом на третий вопрос, поставленный в начале данной главы.

Попробуем рассмотреть это более детально, для чего разобьём ледниковый покров в данном месте Восточной Антарктиды на более крупные участки, проанализируем их отдельно и сопоставим с историей формирования ледника.

1.4. СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК В АНТАРКТИДЕ С НАКОПЛЕНИЕМ ЕГО СЛОЁВ В РАЗЛИЧНЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ ПЕРИОДЫ

При изучении керна льда из скважины на станции Восток проводился анализ возраста льда на различной глубине. Такие данные приведены в статье, посвящённой определению возраста льда в скважине на станции Восток [29]. В статье представлена таблица возраста льда и глубина его обнаружения (местоположения относительно дневной поверхности) (табл. 1.2).

Проверим, помогут ли эти данные понять, имели ли место изменения в осадконакоплении в течение длительного исторического периода, каков их характер и может ли это быть связано с изменением свойств отдельных слоёв льда. По моему мнению, это вполне реально и какие-то взаимосвязи здесь могут существовать.

По данным, приведённым в табл. 1.2, можно построить график соотношения возраста льда и глубины его местонахождения относительно дневной поверхности в настоящее время. При построении будем использовать данные датировки по шкале *GT 4*. Такой график соотношения возраста льда и глубины его залегания относительно дневной поверхности представлен на рис. 1.2. Сопоставим полученную кривую соотношения глубины и возраста льда с имеющимися у нас данными по распределению температур в леднике, которые рассматривались в предыдущем разделе.

Таблица 1.2.

**Возраст льда до глубины 3310 м по результатам двух независимых датировок
ледяного ядра со станции Восток [29]**

Глубина <i>H</i> , м	Возраст льда <i>t</i> , тыс. лет		Невязка шкал, тыс. лет
	Шкала <i>GT4</i>	Шкала <i>GMTS</i>	<i>GT4-GMTS</i>
67	2,0	2,0	0,0
233	9,7	9,6	0,1
448	24,7	22,2	2,5
623	39,1	33,0	6,1
704	45,6	43,9	1,7
811	54,4	52,8	1,6
967	67,8	62,3	5,5
1171	84,2	82,4	1,8
1272	91,4	95,8	-4,4
1389	99,6	105,2	-5,6
1521	109,0	115,2	-6,2
1789	126,4	124,8	1,6
2006	143,3	137,5	5,8
2121	156,2	148,2	8,0
2185	163,4	155,9	7,5
2278	174,7	168,1	6,6
2358	184,9	179,8	5,1
2490	201,5	199,0	2,5
2538	207,1	211,4	-4,3
2596	214,1	217,1	-3,0
2678	225,6	229,6	-4,0
2751	237,3	240,9	-3,6
2810	247,1	251,7	-4,6
2836	252,8	261,7	-8,9
2876	262,4	270,0	-7,6
2932	276,0	284,7	-8,4
2975	286,8	304,2	-17,4
3029	301,3	313,2	-11,9
3050	307,0	323,6	-16,6
3110	322,4	332,4	-10,0
3153	337,1	344,8	-7,7
3168	344,3	356,6	-12,3
3186	353,8	364,4	-10,6
3231	378,2	375,6	2,6
3248	387,8	386,7	1,1
3291	412,0	403,0	9,0
3310	422,8	412,8	10,0

На первый взгляд, кривые, представленные на рис. 1.2, имеют некоторое сходство, т.е., возможно, существует некоторая закономерность между тепловыми процессами в леднике и накоплением слоёв самого ледника. По-видимому, нелинейность кривой изменения температуры в леднике с глубиной может быть связана с тем, что при формировании ледника изменялись условия накопления его отдельных слоёв. Рассмотрим процесс накопления слоёв льда, допустим, за указанные последние 422,8 тыс. лет более детально.

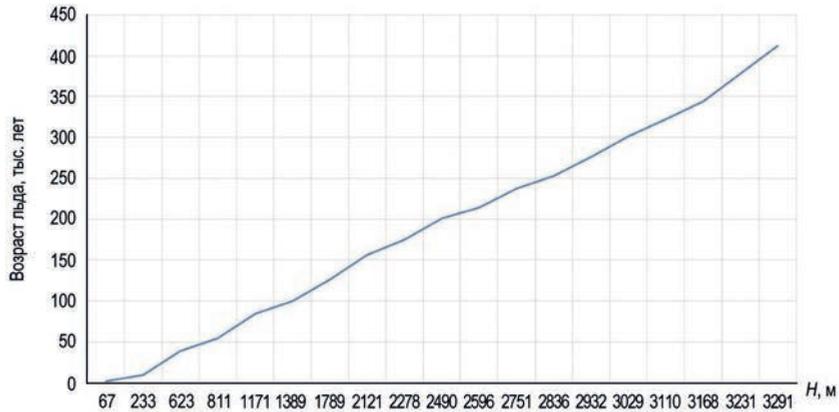


Рис. 1.2. Соотношение между возрастом льда и глубиной его залегания относительно дневной поверхности по данным исследований льда в скважине на станции Восток

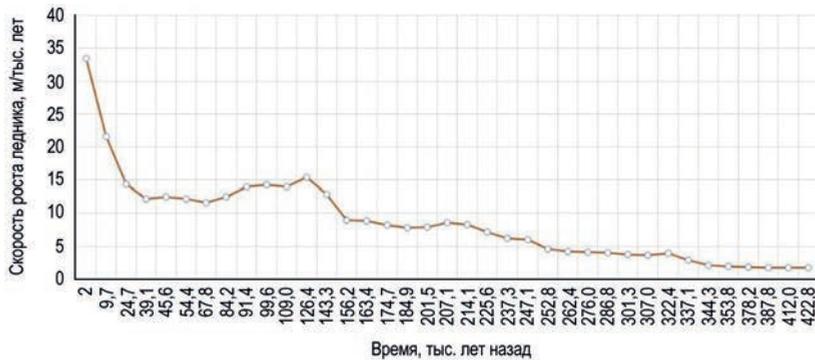


Рис. 1.3. Изменения скорости роста ледника в районе станции Восток в различные временные периоды

Данные о возрасте льда и глубине его местонахождения, приведённые в табл. 1.2, можно рассматривать также и как изменение скорости накопления слоёв льда со временем на каменном основании (или на поверхности «озера Восток»?). Для этого по данным этой таблицы построим график приращения мощности слоёв ледника Δl за определённые интервалы времени Δt . Такой график представлен на рис. 1.3.

На первый взгляд, эти изменения в какой-то степени опять же коррелируются с данными изменений температуры льда, приведёнными на рис. 1.1, и соотношением между возрастом льда и глубиной его залегания, (рис. 1.2).

Характер полученных кривых может говорить о том, что за последние 422,8 тыс. лет оледенения в данном районе Восточной Антарктиды многократно происходили какие-то климатические изменения, которые, видимо, влияли на скорость накопления и состав осадков в виде снега, льда и возможных минеральных включений. Скорость накопления слоёв и наличие минеральных включений может как раз влиять на изменение теплофизических свойств льда, в частности, от их состава и количества может изменяться значение удельной теплопроводности.

Автор считает, что дальнейшее рассмотрение данного вопроса о таком возможном изменении скорости роста льда, изменении его состава и связь этого с изменением физических свойств льда требует привлечения дополнительных сведений из области исторической геологии и климатологии. Также полезным будет рассмотреть имеющиеся керны льда из скважины в плане возможных изменений его тепло-

физических свойств. Пока, исходя из характера кривой изменения скорости роста ледника в районе станции Восток в различные временные периоды, приведённой на рис. 1.3, можно сделать вывод, что по мере приближения к настоящему времени скорость накопления осадков постепенно увеличивалась, причём значительно.

В связи с тем, что имеются общие тенденции изменений теплопроводности и скорости накопления слоёв льда, можно попробовать рассмотреть взаимосвязь между накоплением осадков и изменением их физических свойств уже исходя из хода теплофизических процессов в данном районе Антарктиды.

Изученный в плане возрастов слой льда с глубин от 67 до 3 310 м соответствует временному интервалу накопления слоёв льда от 422,8 до 2,0 тыс. лет назад (см. табл. 1.2). В плане распределения температур изучен слой льда от 180 до 3612,6 м, при этом температура в этом слое льда изменяется от минус 56,652 до минус 6,064 °С. (см. табл. 1.1).

Для определения какой-либо связи между изменениями теплофизических свойств льда и накоплением его отдельных слоёв сначала определим, как меняются значения градиента и удельной теплопроводности в различных частях изученного слоя ледникового покрова этого района. В связи с тем, что мы хотим сравнить этот параметр с изменением скорости накопления осадков, разобьём весь изученный слой льда на обобщённые слои, соответствующие участкам с более или менее равномерными скоростями накопления слоёв льда, и уже для этих обобщённых слоёв определим, как в них изменяются тепловые параметры.

За исторический период от 2,0 до 422,8 тыс. лет назад для последующего сопоставления на рис. 1.3 можно выделить 5 характерных интересующих нас временных интервалов из табл. 1.2: 9,7—67,8 тыс. лет (глубина слоёв льда от 233 до 967 м), 67,8—156,2 тыс. лет (967—2121 м), 156,2—247,1 тыс. лет (2121—2810 м), 247,1—322,4 тыс. лет (2810—3110 м), 322,4—422,8 тыс. лет (3110—3310 м).

Расчёты тепловых параметров в слоях льда, близких к этим глубинным интервалам по данным измерения температур во льду, будем производить по тем же зависимостям и с тем же значением теплового потока 0,05 Вт/м², приведённым ранее в разделах 1.1—1.3. Выделенные временные и глубинные интервалы, полученные значения градиентов и удельной теплопроводности для них приведены в табл. 1.3.

При анализе полученных в результате расчётов значений градиентов, (см. табл. 1.3), по мере приближения к поверхности их значения постепенно уменьшаются, соответственно увеличиваются значения удельной теплопроводности. Это согласуется с графиком изменения измеренной температуры с глубиной, приведённым на рис. 1.1. Однако значение удельной теплопроводности для верхнего слоя льда значительно отличается от теоретически рассчитанных по соотношению 1.4. Из этого соотношения при температуре минус 56,652 °С оно должно быть равно примерно 4,22 Вт·м⁻¹ °С⁻¹.

Чтобы проверить причины таких расхождений, необходимо проведение дополнительных исследований.

Обращает на себя внимание сам по себе факт изменения значений удельной теплопроводности, что, видимо, как-то связано с изменением условий накопления слоёв льда. Пояснений требуют, с одной стороны, пониженные значения удельной теплопроводности в нижних слоях льда и повышение их значений по мере приближения к поверхности. Возможно, однозначно ответы на это можно будет получить при изучении состава кернов льда из скважины; пока же можно высказать только несколько предположений.

Увеличение коэффициента удельной теплопроводности в верхних слоях ледника, там, где проводились измерения, может объясняться как раз увеличением доли ми-

Таблица 1.3

**Расчётные значения удельной теплопроводности отдельных слоёв льда
по результатам измерения температур в скважине в районе станции Восток**

Временной интервал, тыс. лет	Интервал глубин, м (табл. 1.2)	Интервал глубин, м (табл. 1.1)	Температура, °С (табл. 1.1)	Δt , °С	Δl , м	Градиент $\Delta t/\Delta l$	Удельная теплопроводность при 0,05 Вт/м ²
9,7—67,8	233—967	240—960	–56,269... –50,067	6,202	720	0,008614	5,804579
67,8—156,2	967—2121	960—2120	–50,067... –34,732	15,335	1160	0,01322	3,782198
156,2—247,1	2121—2810	2120—2817,5	–34,732... –22,098	12,634	697,5	0,018113	2,760408
247,1—322,4	2810—3110	2817,5—3115,7	–22,098... –16,179	5,919	298,2	0,019849	2,519007
322,4—422,8	3110—3310	3115,7—3314,4	–16,179... –12,172	4,007	198,7	0,020166	2,479411

неральных включений, так как значения удельной теплопроводности геологических пород изменяются в широких пределах, соизмеримых или даже выше, чем у льда.

Конечно, не исключены также и ошибки в представленных в публикациях натурных измерениях (см. табл. 1.1), что вносит какие-то погрешности в приведенные здесь расчёты. В этой связи необходимо проведение дополнительных исследований верхней части ледника.

В рамках данного раздела вызывает определённый интерес отдельно рассмотреть верхний слой льда до глубины 180 м, на который в табл. 1.1 нет данных о температурах во льду, а также и нижний в интервале глубин 3314,4—3612,6 м, на который как раз такие данные есть.

При рассмотрении верхних приповерхностных слоёв ледника можно принять среднюю температуру на поверхности равной –60 °С. В этом случае разность температур для верхнего слоя льда составит 3,348 °С, а температурный градиент будет равен 0,0186 град./м. При таких условиях удельная теплопроводность в этом слое будет равна примерно 2,69 Вт·м^{–1} °С^{–1}, а это значение резко отличается от таковой для нижележащего слоя льда — 5,80 Вт·м^{–1} °С^{–1}, а больше характерно для средних слоёв ледника (см. табл. 1.3). По всей вероятности, это связано с наличием в этом слое воздуха, удельная теплопроводность которого при такой температуре равна примерно 0,02 Вт·м^{–1} °С^{–1}.

Для интервала глубин 3314,4—3612,6 м по аналогичным расчётам получаются следующие значения: разность температур 6,108 °С, разность глубин 298,2 м, температурный градиент 0,0204 град./м, удельная теплопроводность в этом слое будет равна примерно 2,44 Вт·м^{–1} °С^{–1}, что несколько ниже значения для вышележащего слоя (см. табл. 1.3). Тенденция уменьшения удельной теплопроводности льда с глубиной сохраняется.

Более подробно теплофизические свойства нижнего слоя ледника глубже 3612,6 м, на который нет значений температуры в табл. 1.1, будут рассмотрены в одном из следующих разделов.

Отвечая на четвёртый вопрос, поставленный в начале главы, можно сказать, что существует некоторая зависимость хода тепловых процессов в леднике от структуры и состава его отдельных слоёв, которые сформировались в различные исторические отрезки времени в ходе оледенения. Возможно, данная тема требует проведения дополнительных натурных исследований и дальнейшего всестороннего их рассмотрения.

В следующем разделе определим, при каких условиях, исходя из теплофизических зависимостей, могут идти процессы таяния и замерзания нижней поверхности льда.

1.5. УСЛОВИЯ, ПРИ КОТОРЫХ МОЖЕТ ИДТИ ПРОЦЕСС ТАЯНИЯ ИЛИ ЗАМЕРЗАНИЯ НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА ИСХОДЯ ИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С одной стороны, наличие жидкой воды под ледником уже доказано практически при бурении льда как на станции Восток, так и в других районах Антарктиды и Гренландии (см. таблицу Приложения 1). Однако важно понять, будет ли жидкая вода находиться под ледником только в пределах каких-нибудь замкнутых структур, т.е. «озёр», или под ледником могут быть условия, при которых она может находиться и в других областях за пределами этих «озёр».

Рассмотрим, при каких условиях под ледником может существовать жидкая вода исходя из теплофизических процессов в данном и других районах Антарктиды. Ранее уже было установлено, что в Антарктиде существует пусть и незначительный, но геотермальный тепловой поток, идущий снизу из тёплого каменного основания. Сам ледник за счёт низкой теплопроводности выступает как своеобразная теплоизоляция между низкими температурами на поверхности и этим тёплым каменным основанием. Попробуем определить его возможную величину как теплоизолятора исходя из теплофизических процессов.

В соответствии с соотношением 1.1, приведённом в разделе 1.1. при различных значениях теплового потока, разности температур между поверхностью и в основании ледника будет различной в зависимости от его мощности. Теоретически мощность слоя льда для различных теплофизических условий, т.е. при различных величинах теплового потока можно посчитать по тому же соотношению 1.1. Результаты таких расчётов приведены на рис. 1.4.

Эти кривые построены при постоянном значении удельной теплопроводности льда равном $2,22 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Они позволяют ориентировочно оценить, при каких значениях теплового потока, разности температур и мощности ледника могут возникнуть условия для таяния нижней поверхности ледника (или «донного таяния») в тех или иных тепловых условиях, имеющихся в данном районе, т.е. температура будет около $0 \text{ } ^\circ\text{C}$. В реальных условиях необходимо учитывать реальные значения удельной теплопроводности и температуру плавления.

Например, для Восточной Антарктиды в районе станции Восток при величине теплового потока примерно $0,05 \text{ Вт/м}^2$, как уже было сказано ранее, температура на нижней поверхности ледника равна примерно $-3 \text{ } ^\circ\text{C}$, т.е. при средней температуре на поверхности для данного района равной $-60 \text{ } ^\circ\text{C}$ разность температур может составить 57 градусов, а значит, в соответствии с кривыми на рис. 1.4, условия для донного таяния могут возникнуть здесь при мощности ледника даже менее $2 \text{ } 500 \text{ м}$. Опять же эти расчёты приближены и имеют оценочный характер, однако они позволяют хотя бы примерно определить условия для возникновения донного таяния и для других районов Антарктиды, где могут быть другие значения теплового потока или разности температур.

Исходя из кривых, представленных на рис. 1.4, такие условия могут возникнуть практически для значительных площадей в Антарктиде либо за счёт достаточной мощности ледника, выступающего в качестве теплоизоляции между низкими температурами на поверхности и необходимыми для таяния в основании, либо за счёт уменьшения среднегодовых температур на поверхности. Эти соотношения могут не соблюдаться в местах значительных поднятий каменного основания, где уменьшается слой льда, и в таких местах донное таяние будет минимально либо отсутствует вообще.

Исходя из того, что необходимые условия для таяния нижних слоёв льда имеются в большинстве районов Антарктиды, за исключением отдельных участков, это

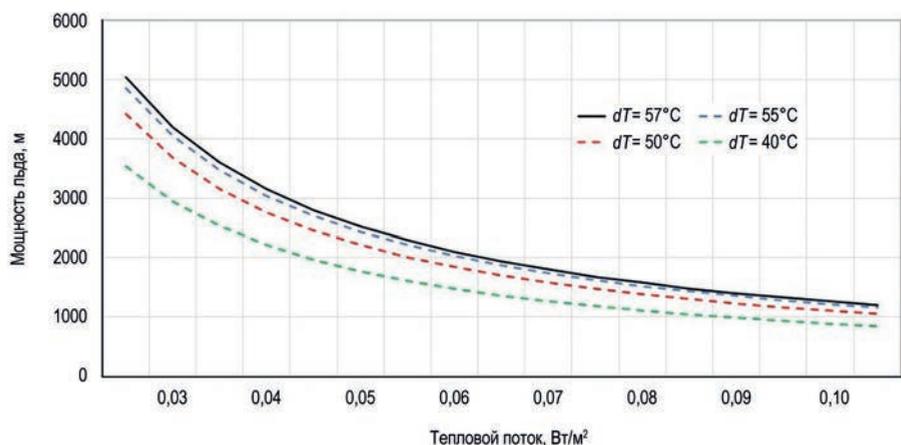


Рис. 1.4. Графики соотношений между геотермальным тепловым потоком, разностью температур между поверхностью и подошвой ледника и мощностью самого ледника, при которых может возникнуть вода в жидком состоянии под ледником Антарктиды

ставит под сомнение высказывания о наличии жидкой воды под ледником только в пределах ограниченных по площади «озёр». Она может присутствовать и за их пределами. Условия же замерзания жидкой воды требуют дополнительного рассмотрения, так как под ледником может существовать переохлаждённая вода и для её кристаллизации требуются специальные условия. Этот процесс мы рассмотрим более подробно в следующем разделе.

В заключение рассмотрения условий для существования жидкой воды под ледником можно сделать несколько важных замечаний, которые являются ответом на пятый вопрос, поставленный в начале этой главы:

1. Условия для таяния или замерзания нижних слоёв льда имеются в большинстве районов Восточной Антарктиды, за исключением отдельных её участков.
2. В зависимости от мощности ледника и температурных соотношений процесс донного таяния может идти с различной интенсивностью.
3. Процесс замерзания жидкой воды в условиях Антарктиды требует отдельного рассмотрения.

Если процессы таяния льда и замерзания воды в Антарктиде реальны, то можно рассмотреть более подробно как они протекают физически и при каких условиях это может происходить. Это будет сделано в следующем разделе.

1.6. ТАЯНИЕ ЛЬДА И ЗАМЕРЗАНИЕ ВОДЫ НА НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕДНИКА И ПРОЦЕССЫ, С ЭТИМ СВЯЗАННЫЕ

В предыдущих разделах на основе теоретических расчётов и практических данных были рассмотрены вопросы, связанные с теплофизическими процессами в леднике в районе станции Восток в Восточной Антарктиде. В них была определена возможная величина теплового геотермального потока для данного региона, удовлетворяющая требованиям температурных соотношений во льду и наличия какого-то количества воды в жидком состоянии под ледником в данном районе. Наличие жидкой воды под ледником было подтверждено практически проникновением в этот слой при бурении скважины 5Г (см. Приложение 1). Помимо жидкой воды в скважине 5Г на станции Восток был обнаружен слой так называемого «озёрного» льда (иногда в публикациях его называют *конжеляционным*), наличие которого здесь вы-

зывает определённые вопросы. В связи с этим необходимо рассмотреть очень важные теплофизические процессы — таяние нижней поверхности ледника и замерзание воды на ней как в данном, так и других районах Антарктиды, а для этого нужно будет последовательно рассмотреть целый ряд связанных с ними вопросов:

1. Как физически протекают процессы таяния льда и замерзания воды в природе?

2. Какие существуют тепловые и временные зависимости при таянии нижней поверхности льда в Восточной Антарктиде?

3. Как может идти процесс донного таяния и идёт ли он в настоящее время в рассматриваемых нами условиях в районе станции Восток?

4. Как может формироваться граница между льдом и водой под ледниковым покровом?

5. Какова возможность замерзания воды в данных условиях и может ли существовать связь этого процесса с наличием под ледником переохлаждённой воды?

6. Насколько равномерно поступление тепла к нижней поверхности льда и от чего оно может зависеть?

7. Оказывает ли влияние на механические процессы в леднике таяние нижней поверхности льда?

Будем последовательно искать ответы на эти вопросы.

1.6.1. Физические зависимости процессов таяния льда и замерзания воды

Чтобы определить, при каких условиях может происходить фазовый переход воды из твёрдого состояния в жидкое и обратно, нам нужно в первую очередь рассмотреть известные в физике особые точки кривых трёх состояний воды (рис. 1.5).

На рис. 1.5 нас должна интересовать область перехода воды из твёрдого состояния в жидкое и обратно, так называемая *Кривая плавления*. На данном рисунке это практически прямая от *Тройной точки до точки $T_{кр}$* , (точки кристаллизации), в которой происходит плавление льда и кристаллизация воды, при нормальном атмосферном давлении и далее она всё более смещается в область пониженных температур и повышенного давления. Именно такое взаимодействие может быть под ледниковым покровом Антарктиды, когда на поверхности низкие отрицательные температуры, а под ледником высокое давление за счёт веса льда. Рано или поздно, при каком-то определённом соотношении между давлением и температурой, может произойти такой фазовый переход воды как в одну, так и в другую сторону.

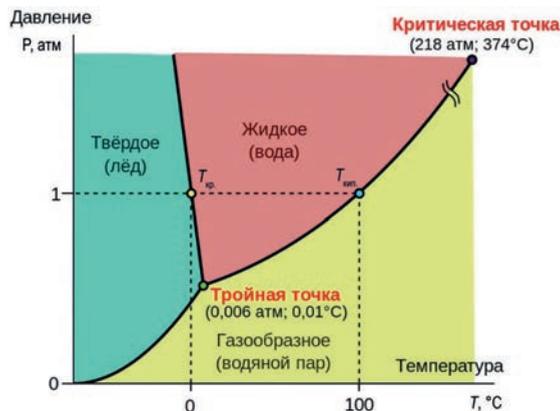


Рис. 1.5. Особые точки трёх агрегатных состояний воды [28]

В наших условиях переход воды из твёрдого состояния в жидкое вполне вероятен при высоком давлении под ледником, это может происходить при отрицательной температуре, а вот обратный переход, помимо температуры и давления, может быть связан с дополнительными факторами, которые мы рассмотрим в дальнейшем.

1.6.2. Тепловые зависимости при таянии и замерзании и возможный дополнительный фактор — время

Из курса физики известно, что переход воды из одного агрегатного состояния в другое происходит при наличии тепла не мгновенно, а постепенно с течением времени. В публикациях по данному вопросу можно видеть такие зависимости между температурой и агрегатными состояниями воды в зависимости от времени (рис. 1.6).

Рассмотрим соотношение между льдом и водой на участках **ABCD** (см. рис. 1.6). В нашем случае график этих соотношений нужно рассматривать несколько иначе, а именно: снизу у нас находится каменное основание, подогреваемое за счёт теплового геотермального потока, выше находится слой жидкой воды и над ним мощный слой льда.

У нас температура растёт вниз, и, в соответствии с этим, необходимо перевернуть на рис. 1.6 шкалу температур. Обозначения отрезков оставим, но смысл происходящих на них процессов изменится: в нашем случае на отрезке **AB** происходит нагревание воды, на **BC** будет одновременно присутствовать лёд и вода, на **CD** идёт нагревание льда. Такая модель тепловых процессов, соответствующая нашим условиям, представлена на рис. 1.7.

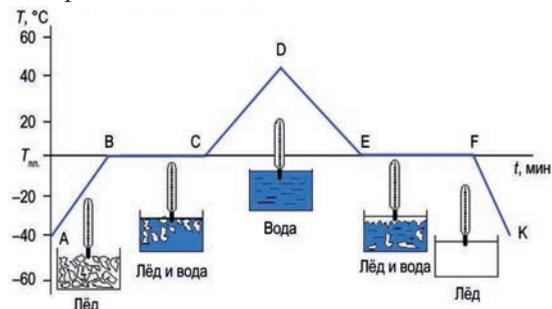


Рис. 1.6. Процессы таяния льда и замерзания воды [39]

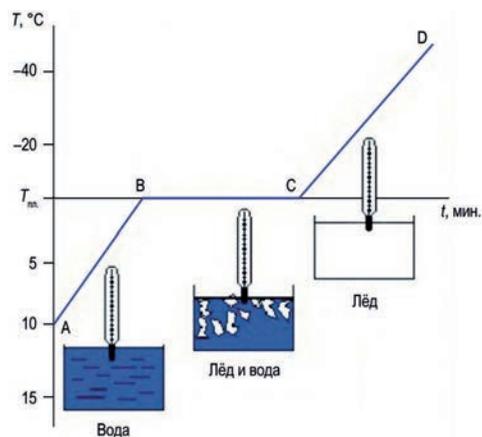


Рис. 1.7. Модель тепловых процессов, соответствующая нашим условиям

Рассмотрим каждый участок тепловых процессов в нашей модели отдельно. На участке **АВ** происходят поддержание воды в жидком состоянии и её нагрев. Температуры на этом участке проставлены условно. Ранее вопрос разности температур между каменным основанием и нижней поверхностью ледника для различной мощности слоя воды уже затрагивался (см. раздел 1.1), какие они реально, возможно, позволят установить дальнейшие натурные исследования.

Рис. 1.7 может служить ответом на первый вопрос данного раздела применительно к нашим условиям.

Более важным для нас сейчас является значение температуры плавления ($T_{пл.}$ на рис. 1.7), при которой, собственно, и происходит переход воды из твёрдого состояния в жидкое и, возможно, обратно, а также и одновременное их присутствие — участок **ВС**. Этот участок при определённой температуре и давлении является участком равновесия между твёрдой и жидкой фазами состояния воды, так как в соответствии с кривой плавления, представленной на рис. 1.5, отклонение температуры или давления в ту или иную сторону приводит к нарушению такого равновесия и происходит либо таяние льда, либо замерзание воды.

На кривой плавления, при повышении давления, переход смещается в область отрицательных температур. Нам необходимо учитывать влияние давления, так как такая точка (или область?) равновесия у нас находится на нижней поверхности мощного ледника величиной более 3 000 м.

Известна следующая зависимость между давлением и температурой: приблизительно $-7,5 \cdot 10^{-3}$ град./атм. [22]. Из публикаций известно, что температура воды в озере, т.е. на границе льда и воды составляет около -3 °С, а давление более 300 атм. [47, 49]. Попробуем уточнить эти сведения.

Можно дать ответ на второй вопрос данного раздела: из кривых фазового перехода воды из твёрдого состояния в жидкое следует, что этот процесс зависит не только от температуры и давления, но и от времени. В связи с этим в течение какого-то времени в каком-то объёме в области такого перехода может одновременно существовать и лёд, и вода.

1.6.3. Процесс донного таяния в рассматриваемых нами условиях в районе станции Восток

Так как условия для возможного донного таяния в районе станции Восток зависят от давления, сначала уточним его. В физике понятие давление (p) рассматривается как величина, численно равная силе (F), действующей на единицу площади поверхности (S) перпендикулярно этой поверхности [7]:

$$p = \frac{F}{S} \quad (1.5)$$

В нашем случае оно будет равно атмосферному давлению плюс силе веса столба льда, действующей сверху вниз на поверхность жидкой воды на определённой площади. Для наших условий эту силу можно определить по формуле:

$$F = mg = V\rho g, \quad (1.6)$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения, V — объём столба льда, ρ — плотность льда.

При расчётах по формулам 1.5 и 1.6 будем исходить из следующих данных: площадь основания примем равной 1 м^2 , плотность льда 920 кг/м^3 , высоту столба льда примем равной значению, при проникновении в слой воды в скважине 5Г на станции Восток $3\,769 \text{ м}$ [9]. На полюсах ускорение свободного падения принимается равным $9,82 \text{ м/с}^2$ [43].

По формуле 1.6 при принятых нами параметрах модели, масса льда получается равной 3 467 480 кг. Сила, действующая на поверхность воды, равна $3\,467\,480 \cdot 9,82 \cong 34\,050\,654$ Н, отсюда давление равно $34\,050\,653$ Н/м² или примерно 34 МПа. При переводе этого давления в атмосферы получим 336,05 атм. Осталось только посчитать, какая при таком давлении может быть температура плавления из приведённого выше соотношения между температурой и давлением: $-7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 336,05 \cong -2,52$ °С. Полученные в результате расчётов значения близки к публикуемым в статьях, посвящённых «озеру Восток».

Интересно сопоставить полученные данные о температуре на нижней поверхности ледника с натурными измерениями в скважине на станции Восток. В таблице 1.1 измерения заканчиваются на глубине 3 612,6 м, температура там равна $-6,064$ °С. На глубине 3 769 м по публикациям она равна около -3 °С, а по нашим расчётам — $-2,52$ °С. Попробуем экстраполировать имеющиеся в нашем распоряжении значения температур из таблицы 1.1 начиная с глубины 3 294,6 м до глубины, близкой к достигнутой границы между льдом и водой — 3 769 м (для удобства расчётов интервалы глубже 3612,6 м разбивались по 10 м). Результат такой экстраполяции представлен на рис. 1.8 точечной линией. Как видно из результатов такой экстраполяции, если линейно продлевать значения температуры в глубину, т.е. при тех же значениях коэффициента теплопроводности, что и раньше, то температуры выходят за нулевое значение, а мы только что установили, что они должны быть около $-2,5$ °С (или -3 °С).

Экстраполируем последнее имеющееся в нашем распоряжении измеренное значение температуры $-6,064$ °С на глубине 3 612,6 м до значения $-2,5$ °С. Результат такой экстраполяции нижних 160 метров ледника представлен на рис. 1.8 пунктирной линией. Результат такой экстраполяции говорит о том, что начиная с какой-то глубины в нижней части ледника значение удельной теплопроводности во льду должно измениться, иначе как объяснить такой излом в значениях температур?

Значение удельной теплопроводности в нижнем слое ледника по измеренным данным, включая линейную экстраполяцию, равно примерно $2,48$ Вт·м⁻¹ °С⁻¹ (см. табл. 1.3), а при расчёте температур на нижнюю часть ледника до значения $-2,5$ °С она равна уже $2,24$ Вт·м⁻¹ °С⁻¹, а это значение ближе к принимаемому для льда при 0 °С.

Это, с одной стороны, говорит о правильности наших расчётов, а с другой стороны — об отличии нижнего слоя ледника от вышележащего по значению удельной теплопроводности, которая здесь хоть и незначительно, но ниже, чем в вышележащем слое, для которого имеются измеренные значения температур. Возникает вопрос: может ли значение удельной теплопроводности льда измениться на какой-то глубине так резко? Может быть это связано с наличием в этом приграничном слое льда жидкой воды, удельная теплопроводность которой значительно ниже, чем у льда и равна $0,6$ Вт·м⁻¹ °С⁻¹ (см. раздел 1.1)? В этом случае, за счёт постепенного появления здесь жидкой воды значения температур на рис. 1.8 ведут себя именно так, т.е. постепенно лёд переходит в жидкую воду и с этим связано постепенное уменьшение значения удельной теплопроводности.

Попробуем проверить это предположение. Для этого воспользуемся формулой определения удельной теплопроводности пористого льда, приведённой в [5], заменив в ней значения удельной теплопроводности воздуха на значения для воды:

$$\lambda_{\text{погр.}} = \lambda_{\text{ч.}} \frac{1 + 0,5f - V_{\text{вд.}}(1-f)}{1 + 0,5f + 0,5(1-f)V_{\text{вд.}}}, \quad (1.7)$$

где $\lambda_{\text{погр.}}$ — удельная теплопроводность в пограничном слое между льдом и водой, $\lambda_{\text{ч.}}$ — удельная теплопроводность чистого льда, f — соотношение между удельными

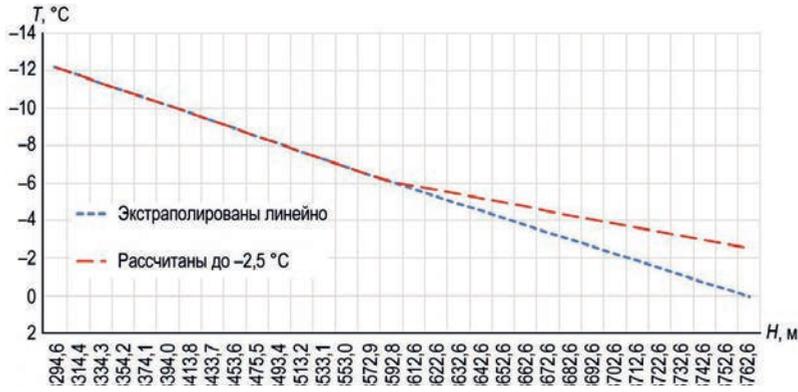


Рис. 1.8. Значения температур льда в нижней части ледника до глубины 3 769 м, полученные экстраполяцией измеренных значений в скважине и теоретически рассчитанные до значения $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

теплопроводностями льда и воды: $f = \lambda_{\text{лд}} / \lambda_{\text{ч}} \cdot V_{\text{лд}}$ — относительный объём воды во льду от 0 до 1.

В нашем случае удельная теплопроводность в таком пограничном слое будет изменяться от значений $2,48\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ во льду до $0,6\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ в воде. По рассчитанным по формуле 1.7 значениям удельной теплопроводности можно рассчитать, как будут изменяться в таком пограничном слое температуры. Результаты такого расчёта представлены на рис. 1.9. На этом рисунке представлена часть экстраполированных значений температур в леднике ниже 3 612 м (см. рис. 1.8), и рассчитанные значения температур при изменяющихся значениях удельной теплопроводности в соответствии с формулой 1.7.

Как видно из рисунка 1.9, при плавном изменении удельной теплопроводности в таком пограничном слое за счёт постепенного увеличения доли жидкой воды, близкие значения температуры для нижней поверхности ледника непосредственно в зоне таяния равного $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ будут в случае начала таких изменений на глубине примерно 3 662 м при температуре во льду около $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.9). Если этот пограничный слой распространяется до глубины 3 769 м, т.е. до предполагаемого слоя жидкой воды, то его величина составляет примерно 107 м.

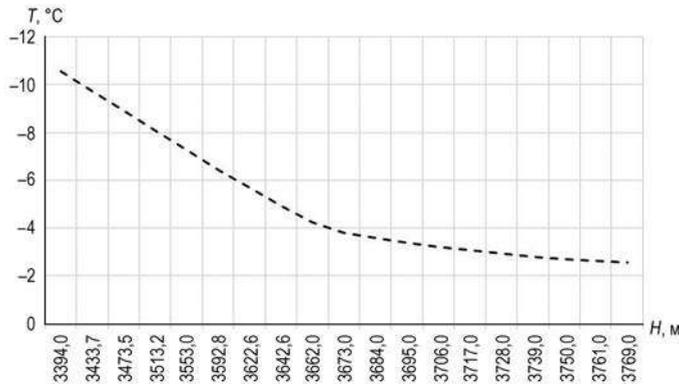


Рис. 1.9. Расчётные температуры в пограничном слое между льдом и водой при изменении значений удельной теплопроводности в зависимости от содержания воды во льду

Видимо, и в этой связи, нужно проводить дополнительные исследования нижней части ледника на наличие там жидкой воды, а пока, с учётом хода теплофизических процессов в этой части ледникового покрова, можно с достаточной степенью уверенности такое предполагать, во всяком случае они этому не противоречат. Такие дополнительные исследования смогут определить идёт ли процесс таяния нижней поверхности ледника здесь и в настоящее время.

Рассмотрев возможность процесса донного таяния в этом районе Восточной Антарктиды можно ответить на третий вопрос этого раздела:

1. Теоретические расчёты показывают, что давление льда на воду под ледником может иметь значение примерно 336,05 атм., а температура на границе $-2,5$ °С, что при величине геотермального теплового потока $0,05—0,06$ Вт/м² достаточно для таяния его нижней поверхности.

2. Из хода теплофизических процессов в нижней части ледника и имеющихся данных по температурам во льду можно сделать вывод о наличии пограничного слоя, в котором происходит плавное изменение величины удельной теплопроводности за счёт наличия в этом слое жидкой воды, и величина его может составлять примерно 107 м.

3. Идёт ли процесс таяния нижней части ледника в настоящее время, сказать затруднительно, так как отсутствуют измеренные значения температур во льду глубже 3612,6 м.

Далее рассмотрим, как может на самом деле формироваться граница между льдом и водой и является ли она такой резкой и контрастной, как считают приверженцы общепринятой гипотезы.

1.6.4. Как может формироваться граница между льдом и водой под ледниковым покровом

В соответствии с участком **ВС** на рис. 1.7, который является пограничным между льдом и водой и в нём одновременно может существовать и лёд, и вода. Такое предположение вполне вероятно, что позволяет теперь рассмотреть, какой при этом может быть реальная граница между льдом и водой.

Наличие пограничного слоя между льдом и водой в данном районе коррелируется с имеющимися сведениями о существовании так называемого «ажурного слоя». Его наличие было обнаружено при сейсмических исследованиях на шельфовых ледниках (рис. 1.10) [5]. И хотя его наличие установлено для границы между льдом и морской водой, не исключено, что он может существовать и на границе с водой пресной.

Образование такого ажурного слоя нужно понимать так, что при приближении, допустим, сверху к границе льда и воды во льду будут сначала встречаться отдельные молекулы воды, затем по мере движения вниз их количество будет постепенно возрастать, потом соотношение между льдом и водой будет 50/50, а глубже будет уменьшаться количество кристаллов льда и увеличиваться количество молекул воды, и глубже кристаллы льда пропадут совсем.

Наверное, такой постепенный переход занимает некоторое пространство по глубине, величина его, видимо, зависит от реальных условий. Вероятно, при увеличении давления на нижней части ледника она может быть больше за счёт более глубокого проникновения воды снизу в лёд. Как было сказано в предыдущем разделе, мощность такого пограничного или ажурного слоя в районе станции Восток может быть около 107 м. Конечно, это требует дополнительных исследований, но в любом случае вряд ли граница между льдом и водой под ледником является такой уж рез-

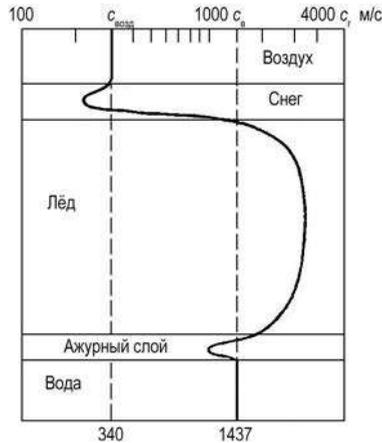


Рис. 1.10. Схематическое распределение скорости звука в системе воздух – снег – ледяной покров – морская вода [5]

$c_{\text{возд.}}$, $c_{\text{в}}$, $c_{\text{г}}$ — скорости распространения акустических (продольных) волн в воздухе, воде и грунте соответственно. Цифры 340 и 1437 зафиксированные значения скорости в воздухе и в воде соответственно (м/с).

кой, контрастной и гладкой, как предполагается в настоящее время в общепринятой гипотезе. Допустить наличие на нижней поверхности ледника в зоне перехода некоторых выступов льда, погружённых в воду на различную глубину, и поднятие воды вверх в сам ледник на некоторую высоту вполне реально. Нельзя забывать, что вода находится под ледником под давлением более 300 атм.

К такому же выводу можно прийти и из следующих соображений. Как уже говорилось ранее, процесс таяния и замерзания (как может проходить процесс кристаллизации воды в наших условиях, рассмотрим позже) зависит как от температуры, так и от давления. В связи с этим можно на прямой перехода льда в воду, изображённой на рис. 1.5, выделить некоторую область, в какой-то мере соответствующую нашим условиям. В нашем случае такой переход может происходить при давлении около 336 атм. и температуре около $-2,5^{\circ}\text{C}$. В реальных условиях вряд ли выдерживаются идеальные параметры такого перехода. По мере погружения выступов нижней поверхности льда в воду и проникновения воды в лёд, помимо измене-

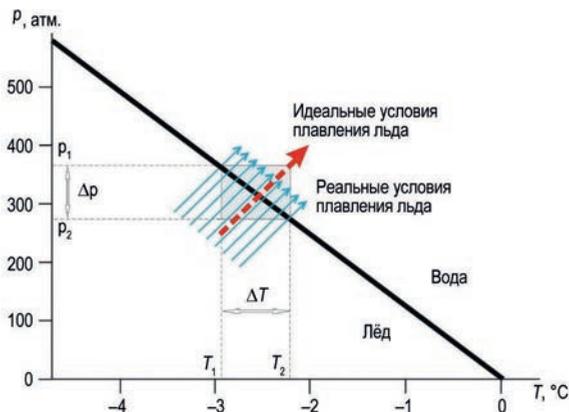


Рис. 1.11. Возможный фазовый переход льда в воду в реальных условиях в нижней части ледникового покрова Антарктиды

ний температуры, в области перехода может одновременно меняться и давление, т.е. условия, при которых может происходить таяние, не будут столь идеальными. Всё это может говорить о том, что реально может существовать некоторая область таких изменений $\Delta\rho$ и ΔT , в которой оно и происходит (рис. 1.11). Для наглядности эта область показана несколько большей, чем это может быть на самом деле. Наличие такой области опять же говорит в пользу размытой границы, занимающей некоторое пространство по глубине.

Подводя итог рассмотрению возможной формы границы между льдом и водой, можно сделать один очень важный вывод, который будет ответом на четвёртый вопрос раздела: — эта граница не может быть резкой и контрастной. Скорее всего, это некоторая переходная область, занимающая некоторое пространство по глубине. Как такая область может проявлять себя на геофизических данных и чем, на самом деле, может быть резкая и контрастная граница под ледником, рассмотрим далее.

1.6.5. Возможность замерзания воды в рассматриваемых нами условиях и возможная связь этого процесса с наличием под ледником переохлаждённой воды

Рассмотрение этого вопроса связано с тем, что при бурении льда на станции Восток в нижней части скважины был обнаружен так называемый *озёрный*, или *конжеляционный лёд* (рис. 1.12) [31].

Общая мощность этих почему-то двух типов озёрного льда 232 м. По предположениям авторов рисунка в публикации, он расположен здесь практически под всем ледником и имеет различную мощность, которая увеличивается при приближении к скважине. Кстати, почему мощность самого ледника по линии тока льда почему-то сначала увеличивается, а потом уменьшается? Видимо, ответить на тот и на другой вопросы, а также на вопрос, почему этих «озёрных льдов» два, смогут приверженцы общепринятой гипотезы, а здесь попробуем разобраться, как и в каком объёме мог там образоваться «озёрный лёд».

Для рассмотрения процесса образования льда из находящейся под ледником жидкой воды придётся вернуться к зависимости от температуры и давления фазового перехода воды из жидкого состояния в твёрдое, которые изображены на рис. 1.5, 1.7 (участок **BCD**) и на рис. 1.11 (если стрелки повернуть в обратную сторону).

Исходя из этих кривых лёд может образоваться либо при охлаждении воды, либо при уменьшении давления. Рассмотрим обе эти возможности применительно к нашим условиям.

Вода обладает рядом специфических свойств по сравнению с другими жидкостями. Эти свойства, известные под названием аномалии воды, определяются строением её молекул и характером молекулярного взаимодействия. Вода способна к значительному переохлаждению, т.е. может оставаться в жидком состоянии при температуре значительно ниже температуры плавления льда [3]. Это приводит к тому, что существует так называемая *переохлаждённая вода*, т.е. вода, находящаяся в неустойчивом (метастабильном) состоянии жидкости [35]. Эта вода может быть охлаждённой до очень низких температур, оставаясь в жидком состоянии, пока она находится в спокойном состоянии и в ней отсутствуют центры кристаллизации. Это говорит о том, что охлаждение воды, находящейся под большим давлением ниже температуры плавления, может не приводить к образованию льда.

Совсем другой эффект будет, если при постоянной температуре уменьшить давление. В этом случае образование кристаллов льда вполне вероятно и в переохлаждённой воде. В качестве центров кристаллизации могут выступать пузырьки

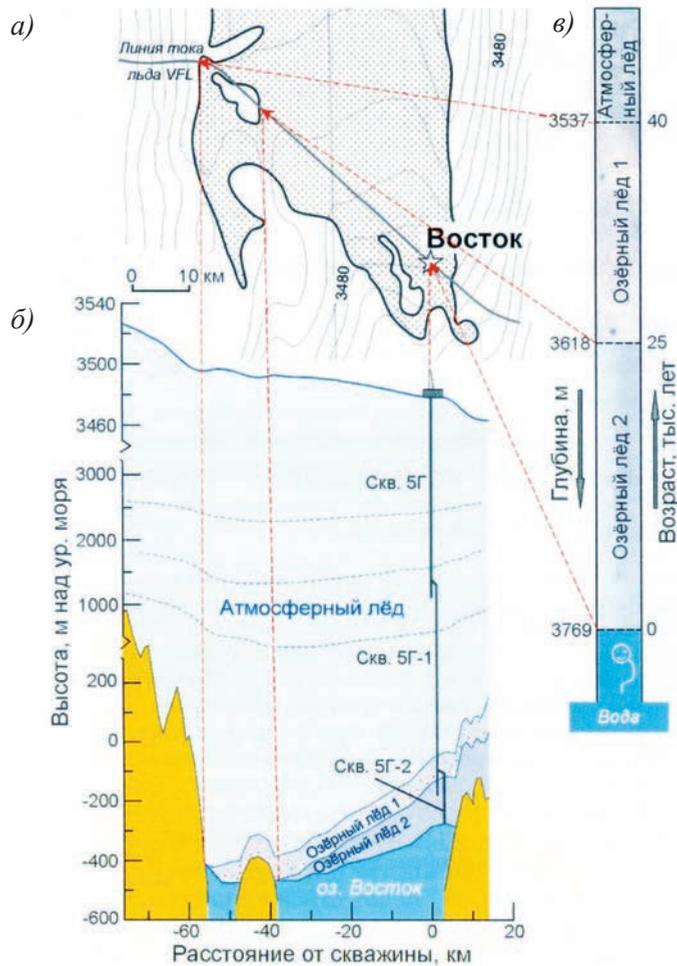


Рис. 1.12. Обнаружение озёрного льда в скважине 5Г [31]

а — схема «озера Восток», б — поперечное сечение через скважину 5Г-1, в — схема призабойной части скважины 5Г-1 с обнаруженным конгеляционным или озёрным льдом.

растворённых в воде газов. Если произошло образование кристаллов льда, то при этом твёрдой воде нужно будет занимать уже больший объём.

На нижней поверхности ледника этот лишний объём может образоваться либо при сжатии воды вниз, либо при поднятии льда вверх. Из курса физики опять же известно, что вода практически не сжимаема, поэтому вариант увеличения объёма вниз отпадает. Для размещения образовавшегося количества льда мощностью 232 м под ледником потребовалось поднять вышележащие слои льда на эту высоту. Чтобы оценить, какое количество энергии на выполнение такой работы при этом было затрачено, можно попробовать определить, на сколько изменилась потенциальная энергия поднятого льда. Из законов сохранения на изменение потенциальной энергии тела определённой массы нужно затратить необходимое количество какой-то другой энергии. Рассмотрим, какие могут иметь место энергетические зависимости в нашем случае.

При фазовых преобразованиях воды существуют следующие энергетические зависимости: удельная теплота плавления и отвердевания. Удельная теплота плавления льда — это определённое количество тепловой энергии, затрачиваемой на переход единицы массы льда при его фазовом превращении из кристаллического состояния в жидкое при температуре плавления. При $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении для чистого льда эта величина равна 334 кДж/кг . При отрицательных температурах значение удельной теплоты плавления ниже, например, при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ её значение 308 кДж/кг [5]. При замерзании воды такое же количество энергии выделяется. Видимо, зависимости этой величины от давления нет, поэтому будем считать, что значение 300 кДж/кг подходит для рассматриваемых нами условий.

Оценим, какое количество энергии высвободилось при образовании льда на нижней поверхности ледника площадью 1 м^2 и мощностью 232 м . Масса этого льда равна $232 \cdot 920 = 213\,440\text{ кг}$. При разности в плотностях льда и воды $1,09$ замёрзло примерно $232\,650\text{ кг}$ воды и при этом выделилось $232\,650 \cdot 300\,000 \cong 69,8 \cdot 10^9\text{ Дж}$ или $69,8\text{ ГДж}$ энергии.

Такое количество энергии выделяется в наших условиях только при замерзании воды на 1 м^2 , а сколько её выделится в соответствии с рис. 1.12 на всей площади южной части «озера» трудно вообразить. Есть предположение, что вода замерзает только на севере и востоке структуры, а на юге и западе лёд тает [47]. Учитывая размеры «озера», при масштабах такого процесса, представленных в данной публикации, количество выделяемой при замерзании энергии будет действительно колоссальной. На что она затрачивается, какая работа ею совершается?

Представить, что образование льда произошло в таких масштабах, показанных на рис. 1.12 или в [47] за счёт изменения температуры или давления весьма затруднительно, к тому же на рис. 1.12 этот «озёрный» лёд выходит за пределы «озера», как он мог там образоваться и как вообще физически происходит процесс замерзания воды под ледником, могут, видимо, объяснить нам приверженцы общепринятой гипотезы.

В связи с тем, что фактически озёрный лёд был в скважине действительно обнаружен, более реально предположить, что замерзание воды и образование льда произошло непосредственно в основании скважины диаметром 137 мм . При указанных размерах основания скважины количество теплоты при замерзании здесь слоя воды высотой 232 м получается очень незначительным, всего около $1,03\text{ МДж}$.

А вот вопрос: почему вода поднялась на такую большую высоту и замёрзла, требует отдельного рассмотрения.

Как известно из публикаций, вода несколько раз поднималась снизу в ствол скважины на различную высоту, выталкивая некоторую часть заливочной жидкости на поверхность, а при проникновении непосредственно в воду она поднялась в скважине почти на 500 м , (точнее, поднялась в скважину и остановилась на глубине примерно $3\,200\text{ м}$ (по керну) [9], т.е. практически давление воды на нижней поверхности ледника оказалось выше расчётного.

Подъём воды в скважине на такую высоту может говорить о том, что реальная поверхность «озера» находится примерно на таком же расстоянии выше от глубины проникновения в водный слой. К этому вопросу мы ещё вернёмся при рассмотрении распространения жидкой воды под ледником; пока отметим, что с этим как раз могло быть связано образование того самого «озёрного льда», обнаруженного в забое скважины. В пользу этого говорит то, что поднимавшаяся в скважину вода могла замёрзнуть либо при резком снижении давления в месте проникновения в «озеро», либо из-за более низких температур в этих слоях ледника (см. рис. 1.8, 1.9). В том

и другом случае мог произойти фазовый переход воды в лёд (см. рис. 1.11), только в этом случае такой лёд имеет локальное распространение, и наличие его за пределами или на некотором удалении от скважины является некоторой фантазией авторов публикаций, в одной из которых и был помещён этот рисунок (см. рис. 1.12). Хорошо, если бы они привели какие-нибудь доказательства своей правоты.

Судя по всему, этот «озёрный лёд» должен отличаться по своим свойствам от лежащего выше материкового льда, который на рис. 1.12 обозначен как «атмосферный лёд». В дальнейшем мы проверим может ли этот лёд как-то проявлять себя на геофизических данных за пределами скважины.

Рассмотрев процесс замерзания воды на нижней поверхности ледника в условиях Антарктиды, можно сделать несколько вполне обоснованных предположений, которые будут ответом на пятый вопрос, поставленный в начале данного раздела:

1. В условиях Антарктиды вполне вероятно наличие под ледником переохлаждённой воды, имеющей отрицательную температуру и находящейся в спокойном равновесном состоянии под высоким давлением;

2. Для кристаллизации этой воды требуются условия, к которым относятся уменьшение давления и возникновение центров кристаллизации;

3. В условиях, которые существуют на нижней поверхности ледника в районе станции Восток, образование «озёрного льда», т.е. льда из подледниковой жидкой воды, могло произойти при проникновении скважины в переходный слой между льдом и водой, что привело к уменьшению давления здесь и возникновению центров кристаллизации за счёт образования пузырьков растворённых в воде газов.

Пока на основании всего вышесказанного в этой главе можно предположить, что процессы таяния нижней поверхности ледника, а при определённых условиях и замерзания воды в ограниченном объёме вполне реальны. В зависимости от количества подводимого снизу тепла процесс таяния может идти с различной скоростью, но при этом он неизбежно должен влиять на другие процессы в леднике, в первую очередь, на его движение вниз в вертикальном направлении. Далее в одной из следующих глав рассмотрим это более подробно.

1.6.6. Возможные причины неравномерного подвода тепла к нижней поверхности ледника в Антарктиде

Причинами неравномерного подвода тепла к нижней поверхности ледника могут служить рельеф и состав пород каменного основания. Если считать, что величина теплового потока на достаточно больших площадях на какой-то значительной, по сравнению с мощностью ледника, глубине практически одинакова, то по мере продвижения вверх на распределение тепла будут уже сказываться рельеф поверхности и удельная теплопроводность веществ, слагающих этот рельеф.

Как видно из полученных в разных районах Антарктиды радиолокационных данных, рельеф подстилающего каменного основания в Антарктиде весьма разнообразен, т.е. существуют как положительные (антиклинальные), так и отрицательные (синклинальные) формы рельефа. Если считать передачу тепла от нагретого тела к холодному как процесс распространения инфракрасных волн, то рельеф подлёдно-подводной поверхности влияет на поступление тепла с различных направлений, т.е. из-за неровностей рельефа может возникнуть эффект фокусировки или наоборот рассеяния этих волн. Если не вдаваться глубоко в теорию этих процессов, можно заметить только то, что при прочих равных условиях в пониженных участках рельефа в синклиналях лучи будут фокусироваться, а по краям антиклиналей они будут рассеиваться. В первом случае за счёт фокусировки процесс таяния будет идти более

интенсивно, что должно приводить к увеличению количества жидкой воды в этих местах, а значит, здесь и будет наблюдаться увеличение мощности водного слоя под ледником и, наоборот, по мере поднятия вверх по рельефу мощность этого слоя должна уменьшаться, а в отдельных местах между ледником и основанием слой жидкой воды может вообще отсутствовать.

Вторым важным фактором, влияющим на количество поступающего тепла, т.е. на ход таяния льда, является состав пород. В первой главе уже рассматривалось, как удельная теплопроводность веществ связана с градиентом, т.е. изменением температуры в зависимости от удаления от источника тепла за счёт поглощения этого тепла средой. Понятно, что с увеличением расстояния от источника тепла до какой-то точки подледниковой поверхности температура будет понижаться. В связи с этим участки каменного основания с различным составом слагающих их пород нужно рассматривать как участки с различными температурами в их основании и на их поверхности, и здесь, опять же за счёт увеличения мощности геологических слоёв, чем выше мы будем подниматься по склону какого-то поднятия, тем ниже будет его температура, и наоборот. Это должно так же, как фокусировка и рассеяние, отражаться на процессе таяния льда и, соответственно, изменения величины слоя жидкой воды будет заметны на радиолокационных разрезах, которые будут анализироваться в дальнейшем.

После рассмотрения условий подвода геотермального тепла к нижней поверхности ледника ответом на шестой вопрос раздела будет следующее:

1. Одинаковое на некоторой глубине, которая значительно больше, чем мощность ледника, геотермальное тепло подводится к нижней поверхности ледника неравномерно из-за различного состава пород и неровностей рельефа каменного основания;

2. Вследствие этого интенсивность донного таяния и образования жидкой воды под ледником может идти с разной скоростью на различных участках подледного каменного основания.

3. Неравномерная скорость донного таяния, т.е. изменение мощности слоя жидкой воды должно подтверждаться данными радиолокации.

Отвечая на последний вопрос данного раздела, остаётся рассмотреть, как влияет процесс донного таяния на механические процессы в леднике

1.6.7. Влияние донного таяния на механические процессы в леднике

Мы не можем пока однозначно ответить на следующие вопросы: тает ли в настоящее время нижняя поверхность ледника в данном районе Антарктиды, происходит ли здесь кристаллизация воды или оба эти процесса находятся в статическом равновесии и ничего не происходит? Наличие этих процессов здесь и в других районах Антарктиды зависит от реальной тепловой обстановки на границе льда и воды, а наличие того или другого процесса в настоящее время можно определить только дальнейшими исследованиями, аналогичными таковым в районе станции Восток.

Допустим, что в настоящее время на границе здесь соблюдается статическое равновесие между льдом и водой и никаких изменений не происходит. Однако за всю историю развития ледникового покрова Антарктиды на Земле многократно происходили климатические изменения, и можно с определённой уверенностью предположить, что в периоды потепления изменялась температура на поверхности ледника, а это, как мы теперь понимаем, должно было привести к изменению и температуры на его нижней поверхности. В связи с тем, что геотермальный тепловой поток существовал всегда, (а может быть, был даже большим, чем сейчас), таяние нижней поверхности

ледника в Антарктиде при определённых условиях было бы неизбежным. Попробуем предположить, как при этом реагировали бы на это отдельные слои в леднике?

Как известно, форма накопленных осадков, выпадающих на ровную поверхность близка к горизонтальной. Скорее всего, так было и в Антарктиде по мере заполнения в ходе оледенения неровностей коренного рельефа снегом и льдом. Если накопление слоёв происходило при изменяющихся климатических условиях, то это должно было влиять на количество и качество осадков, т.е. на мощность этих слоёв и состав льда в них. Если в ходе оледенения нижние слои ледника таяли, то это неизбежно должно было как-то отразиться на форме и положении вышележащих слоёв льда, накопленных в ходе формирования ледникового покрова. Для рассмотрения таких возможных изменений мы должны уже привлечь имеющиеся в публикациях геофизические данные, полученные в различных районах Восточной Антарктиды.

Основным геофизическим методом, позволяющим дать представление о ледниковом покрове, является радиолокационное зондирование. Не будем останавливаться здесь на его особенностях (подробно основные особенности применяемого при исследовании ледников радиолокационного метода проанализированы в приложении 2), сейчас просто рассмотрим один из профилей такого зондирования, который как раз проходит в районе депрессии в этом районе Антарктиды через станцию Восток и идёт в северном направлении через «озеро Восток» (рис. 1.13). Попробуем

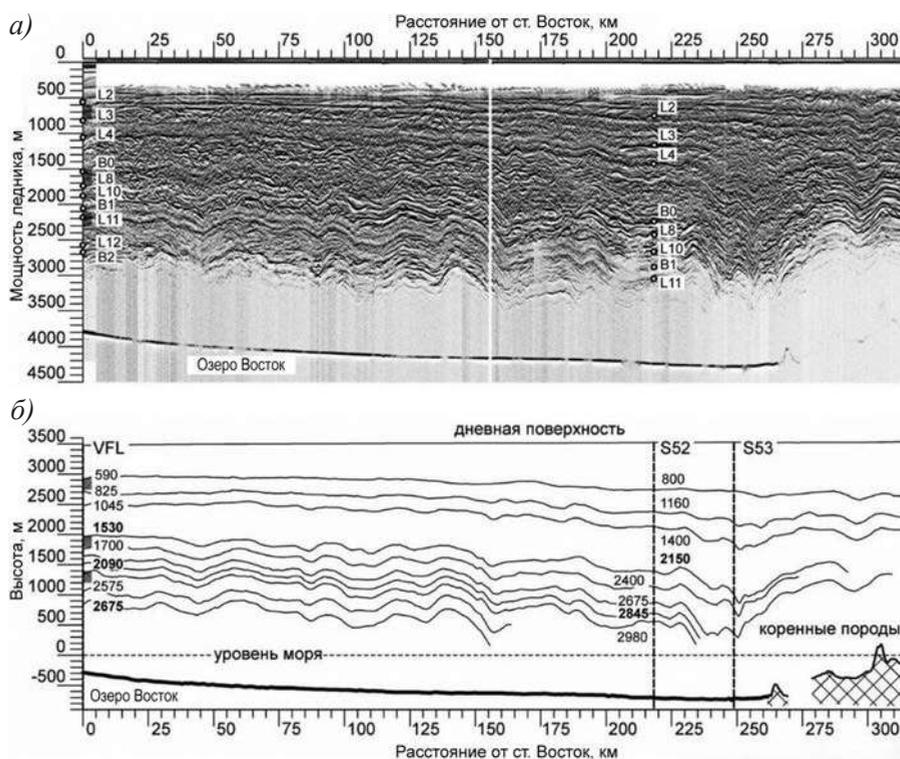


Рис. 1.13. Радиолокационные данные (а) и их интерпретация (б), полученные при исследовании «озера Восток» с юга на север (материалы ПМГРЭ):

а) — индексы изохронных поверхностей в ледниковом покрове; б) — прослеживаемость и глубина их погружения с юга на север в пределах депрессии Восток (по С.В. Попову).

на этом разрезе рассмотреть, как проявляют себя те процессы, о которых говорилось ранее.

Данный радиолокационный разрез даёт представление обо всём ледниковом покрове по всей его мощности и о каких-то границах под ним. Возраст отдельных слоёв внутри ледника определён по данным бурения на станции Восток, которые приведены ранее (см. табл. 1.2). Мощность ледника и высота в метрах на шкалах слева на рис. 1.13 получены из значения скорости распространения электромагнитных волн во льду. Более подробно интерпретация полученных данных радиолокационных исследований рассмотрена в приложении 2.

На данном радиолокационном разрезе, а также и на других аналогичных, полученных в других внутриконтинентальных районах Восточной Антарктиды, по мере погружения вниз от дневной поверхности до глубины примерно 500 м имеется слой льда без явных признаков слоистости (с чем могут быть связаны особенности этого слоя, мы рассмотрим более подробно в дальнейшем).

На глубинах от 500 до примерно 2 700 м на данном временном радиолокационном разрезе имеется слой льда с хорошо выраженной слоистостью, которая ниже постепенно пропадает и появляется слой (льда?) с полным её отсутствием, т.е. этот слой на радиолокационном разрезе однороден.

Сначала рассмотрим особенности слоя с явно выраженной слоистостью. Такая слоистость во льду большинством исследователей объясняется неоднородностью отдельных слоёв ледника за счёт накопления осадков. Так как накопление осадков в виде снега и минеральных включений происходило неравномерно в различные исторические периоды, эти хорошо различимые слои на радиолокационных разрезах трактуются как изохронные поверхности, и с этим можно согласиться. Как такое изображение формируется на радиолокационном разрезе, поясняется в Приложении 2.

Постепенное пропадание слоистости с глубиной приверженцы общепринятой модели объясняют затуханием сигнала, но это входит в противоречие с тем, что ниже амплитуда сигнала остаётся достаточно высокой и нижележащая контрастная граница хорошо выделяется. Исходя из высказанных выше соображений о границе между льдом и водой, объяснением постепенного пропадания слоистости на определённой глубине может быть как раз наличие в основании ледника переходного или пограничного слоя с одновременным присутствием льда и жидкой воды, реальность существования которого обсуждалось выше (см. разделы 1.6.3, 1.6.4). В соответствии с представленным радиолокационным разрезом, мощность такого переходного слоя вполне может быть первые сотни метров.

Расположенный ниже однородный слой с полным отсутствием признаков слоистости на радиолокационном разрезе имеет мощность около 1 000 м (это при скорости распространения электромагнитных волн во льду 170 м/мкс), т.е. он не соответствует тому самому «озёрному» льду, обнаруженному в основании скважины. Если это лёд, то он имеет здесь слишком большую мощность. Ранее говорилось, что слой этого льда в районе станции Восток всего 232 м (см. рис. 1.12). К тому же этот слой на разрезе распространяется за пределы «озера», а там он никак не мог образоваться из воды, которая по версии приверженцев общепринятой гипотезы располагается только в пределах структуры. Более вероятно предположить, что этот слой может быть как раз *слоем жидкой воды*, а расположенная выше переходная зона является *пограничным слоем между льдом и водой*. К тому же водный слой вполне может присутствовать и за пределами геологической структуры в районе станции Восток, так как донное таяние возможно и там (см. раздел 1.2).

Ниже однородного слоя на радиолокационном разрезе наблюдается отражение от какой-то постепенно погружающейся в северном направлении контрастной границы. По мере дальнейшего продвижения профиля на север она заменяется другой, более размытой и не так хорошо прослеживаемой границей, имеющей уже значительные перепады глубин относительно дневной поверхности. В общепринятой модели строения «озера Восток» эта контрастная граница считается границей между льдом и водой, что как раз и стало основой предположения о наличии здесь подледникового озера, так как эта граница имеет ограниченное распространение. В дальнейшем будет высказано и подробно рассмотрено предположение, что появление такой границы на радиолокационном разрезе может быть вызвано совсем другими причинами.

Слева на рис. 1.13, а показаны условные метки возраста льда по анализу кер-на, о котором говорилось ранее, а на рис. 1.13, б — на какой глубине они залегают. Благодаря этим меткам можно проследить, как ведёт себя каждый разновозрастный слой, т.е. изохронные поверхности при прослеживании их на север от скважины. Судя по интерпретации, приведённой на нижнем рисунке, по мере удаления от скважины слои в средней части ледника погружаются на большую глубину и становятся всё более изогнутыми. Характерно также то, что по мере увеличения расстояния от скважины некоторые нижние слои перестают прослеживаться. Например, сначала пропадают слои L12 и B2, затем B1 и L11.

Вследствие того, что хорошо прослеживаемые слои льда расположены на севере структуры на большей глубине относительно их расположения в районе станции Восток, можно смело предположить, что такие изменения произошли из-за неравномерно протекающего здесь *таяния нижней поверхности ледника*. Этот процесс может идти где-то более, где-то менее интенсивно и протекает в настоящее время или протекал в прошлом. Как раз с этим процессом связано погружение ледника и образование складок. Этим же можно объяснить пропадание нижних более древних слоёв ледника.

Анализ имеющихся радиолокационных данных позволяет предположить, что донное таяние приводит к разрушению нижней части ледника и его постепенному погружению, т.е. является причиной его вертикального движения, причём это погружение может идти с различной скоростью, за счёт чего в леднике образуются синклиналильные структуры. Эти предположения будут ответом на седьмой вопрос данного раздела и будут подробно рассмотрены в дальнейшем в главе, посвящённой механическим процессам происходящим в леднике.

Итак, рассмотрев теоретически те теплофизические процессы, которые могут идти в каменном основании, слое подледниковой воды и в самом леднике, мы нашли ответы на целый ряд вопросов, поставленных в начале этой главы и раздела 1.6, но эти ответы, к сожалению, расходятся с мнением большинства исследователей придерживающихся общепринятой гипотезы. Если они смогут дать ответы на эти двенадцать вопросов в той же последовательности, но со своими аргументациями, только в этом случае они смогут доказать свою правоту.

Заканчивая анализ теплофизических процессов в ледниковом покрове Антарктиды, можно перейти к рассмотрению взаимодействия льда и жидкой воды, что позволит определить, как обширно она может быть распространена под ледником и как ведёт себя в этих условиях.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЬДА И ВОДЫ

То, что наличие жидкой воды возможно под большей частью ледникового покрова Антарктиды, подтверждается существованием на радиолокационных разрезах однородной зоны между ледником с хорошо выраженной слоистостью и каменным основанием. Если взять за основу предположение, что это и есть жидкая вода, то в связи с этим возникает несколько вопросов, связанных с соотношением между нею и находящимся сверху льдом, что, между прочим, напрямую затрагивает вопрос существования «озера Восток» в том виде, как его описывают приверженцы общепринятой гипотезы. В настоящее время существует два предположения о его возникновении: оно реликтовое, образовалось до оледенения и просуществовало до настоящего времени или более молодое и образовалось из талой воды. Прежде чем ответить на этот главный вопрос — чем же на самом деле является геологическая структура, расположенная в районе станции Восток в Восточной Антарктиде, необходимо рассмотреть несколько не менее важных вопросов, касающихся взаимодействия льда и воды:

1. Каким должно быть положение и распространение жидкой воды, находящейся между льдом и каменным основанием?
 2. Каковы особенности распространения жидкой воды под ледником вследствие давления льда на воду?
 3. Может ли под ледником существовать реликтовое «озеро Восток» со слоем жидкой воды более 1 000 м?
 4. Могло ли такое «озеро» образоваться из талой воды?
- Будем последовательно находить ответы на них.

2.1. ВОЗМОЖНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЖИДКОЙ ВОДЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ МЕЖДУ ЛЬДОМ И КАМЕННЫМ ОСНОВАНИЕМ

Этот вопрос, казалось бы, не имеет прямого отношения к затрагиваемой теме, но он очень важен для понимания взаимодействия льда и воды и правильной интерпретации радиолокационных данных. Приведу разрез, полученный на маршруте, проходящем с юго-запада на северо-восток над депрессией Восток или «озером Восток» (рис. 2.1).

На представленном разрезе прежде всего обращает на себя внимание своеобразное примыкание «водной поверхности “озера Восток”» к каменному основанию, которое может быть как вверх по склонам, так и почему-то вниз. Я не буду здесь искать причины формирования такого рельефа «водной поверхности» и такой картины её примыкания, как на рис. 2.1, пусть это объясняют приверженцы общепринятой гипотезы. Такая картина на радиолокационных разрезах может наблюдаться как раз за счёт различий в пластовых скоростях геолого-геофизической модели при изменении мощности низкоскоростного слоя (см. Приложение 2).

Как повела бы себя жидкая вода, оказалась она в таком положении, когда она образуется из льда, залегает на тёплом основании, которое поддерживает её в жидком состоянии, а сверху на неё давят вышележащие ещё не растаявшие слои льда? Попробуем разобраться, каким должно быть прилегание жидкой воды к каменному основанию в данных условиях с точки зрения здравого смысла, а также законов как теплофизики, так и гидрофизики.

Ранее уже было высказано предположение о том, что условия для плавления льда могут существовать и на склонах поднятий каменного основания, но они по

мере поднятия по склону будут постепенно изменяться, а значит, будет постепенно уменьшаться и слой жидкой воды (см. разделы 1.2 и 1.6.6).

Значит, вполне вероятно наличие жидкой воды до какой-то определённой высоты на склонах каменного основания. Этому условию полностью удовлетворяет распространение однородной зоны на рис. 2.1 и на других радиолокационных разрезах (см. рис. 1.13).

Здесь опять уместно напомнить, что приводимые радиолокационные разрезы имеют сильно уменьшенный (сжатый) горизонтальный масштаб, а скорость распространения электромагнитных волн в воде значительно ниже, чем во льду, поэтому реально мощность однородной зоны (жидкой воды) должна быть примерно в пять раз уже (см. Приложение 2).

Предположения о возникновении и распространении слоя жидкой воды, вытекающие из теплофизических закономерностей, достаточно убедительны, но помимо этого, на примыкание воды к каменному основанию может влиять ещё и давление на воду вышележащих слоёв льда, и тогда можно рассмотреть эту зависимость более подробно.

Ледник за счёт своих пластичных свойств не может «висеть» над водой, и жидкая вода подо льдом не может иметь «поверхности», она просто заполняет промежуток между льдом и каменным основанием. Условно такой поверхностью может быть нижний слой ледника, где уже нет молекул воды в кристаллах льда (см. разделы 1.6.3, 1.6.4), но, в отличие от открытого водоёма, положение такой поверхности невозможно установить точно. Наиболее реально предположить, что слой жидкой воды расположен в виде тонкой относительно мощности ледника водной прослойки между льдом и каменным основанием, такой вывод может быть, в какой-то степени, ответом на первый вопрос данной главы.

Рассмотрим более подробно, каково влияние давления льда на нижележащий слой жидкой воды.

2.2. К ЧЕМУ ПРИВОДИТ ДАВЛЕНИЕ ВЫШЕЛЕЖАЩЕГО СВЕРХУ ЛЬДА НА ЖИДКУЮ ВОДУ?

Распространение жидкой воды под давлением вверх по склонам каменного основания может подтверждаться и законами гидрофизики. На жидкую воду под ледником воздействует внешнее давление, величина которого зависит от массы вышележащих слоёв льда. Оно будет максимально в пониженных участках рельефа, где слой льда максимальный, и постепенно уменьшаться по мере изменения массы льда на поднятиях каменного основания. Отметим, что дневная поверхность ледника достаточно выровнена по сравнению с рельефом каменного основания.

В гидрофизике имеется понятие полного гидростатического давления P , которое передаётся по горизонтали во все стороны одинаково и величину которого можно определить по следующей формуле [24]:

$$P = P_0 + \rho g(h - z) = const, \quad (2.1)$$

где P_0 — внешнее давление, ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, $(h - z)$ — расстояние от нулевого уровня (открытой поверхности) жидкости (z положительно при направлении вверх).

В нашем случае из выражения 2.1 следует, что полное гидростатическое давление на границе льда и воды повышается как при увеличении мощности ледника (P_0), так и по мере увеличения расстояния от поверхности водоёма вниз ($h - z$).

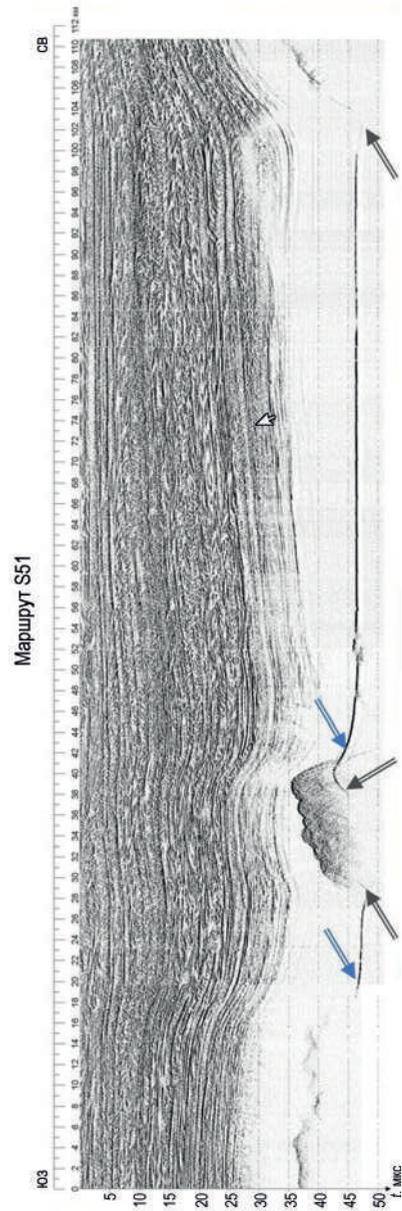


Рис. 2.1. Радиолокационный разрез через «озеро Восток». Стрелками показаны места примыкания «поверхности «озера Восток»» к каменному основанию по версии приверженцев общепринятой гипотезы (материалы ПМГРЭ)

При бурении скважины на станции Восток предполагалось, что поверхность водного образования («озера Восток») находится на границе льда и воды, т.е. на контрастной границе под ледником (см. рис. 1.13 и 2.1). Исходя из этих соображений, подбиралась плотность жидкости, заливаемой в скважину, близкую к плотности льда. Если вода имеет большее распространение, т.е. она распространяется на склоны окружающих структуру поднятий, то необходимо было учитывать помимо массы льда и массу воды, которая могла поступить (и поступила) в скважину на такую высоту.

В разделе 1.6.5 было упомянуто поднятие воды вверх по скважине в месте проникновения в жидкую воду в районе станции Восток на высоту около 500 м (точнее на 569,3 м, см. Приложение 1). С учётом величины $(h - z)$ в формуле 2.1 это можно объяснить повышенным гидростатическим давлением за счёт расположения уровня проникновения скважины в жидкую воду ниже окружающих возвышенностей как раз примерно на 500 м.

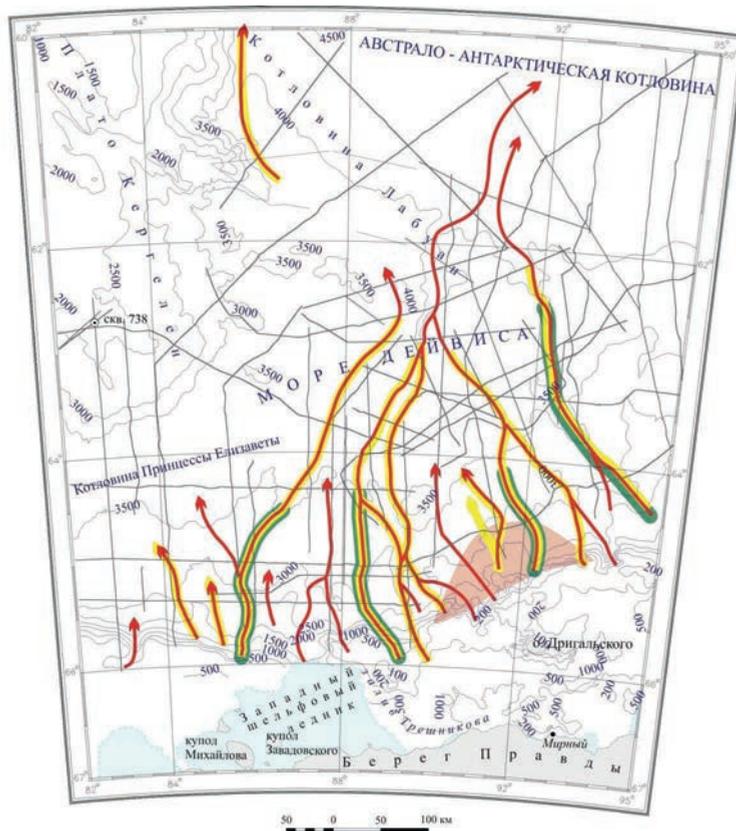
При обширном распространении жидкой воды под ледником гидростатическое давление максимально в пониженных участках, а вверх по склону оно ниже за счёт как уменьшения разности высот, так и внешнего давления. Это приводит к возникновению разницы полного гидростатического давления между пониженными участками и на поднятиях каменного основания, что, в свою очередь, может быть причиной того, что вода под действием этой разницы в гидростатическом давлении перемещается вверх по склону и, вероятно, далее за пределы структуры, в которой она образовалась. Разница давлений является также причиной возникновения подледникового стока талой воды в окружающие моря, что можно рассмотреть более подробно.

Из высказываемых здесь предположений наличие воды подо льдом возможно почти везде, и поэтому становится важным вопрос: что происходит с ней в прибрежных областях. Здесь, опять же, в соответствии с выражением 2.1, гидростатическое давление в воде, находящейся на одной и той же глубине относительно уровня моря, будет различным — под слоем льда оно выше, в открытой воде ниже. И теперь, если допустить, что эти водоёмы сообщаются, т.е. вода под ледником связана с окраинными морями по подледниковым каньонам, то она неизбежно должна вытекать в окружающие моря за счёт разницы давлений.

Если такой процесс, т.е. сток талой воды в Южный океан, действительно существовал в прошлом или существует сейчас, то должны быть его проявления в виде подводных каньонов и конусов выноса. Именно такую картину мы наблюдаем в настоящее время у побережья Восточной Антарктиды за пределами самого ледника (рис. 2.2).

Пусть эти каньоны начали формироваться ещё в то время, когда в Антарктиде существовали реки, но то, что мы наблюдаем их в наше время, говорит о том, что сток подледниковой воды тоже вносит свою лепту в этот процесс. Очевидно, что это требует дополнительных исследований, которые, надеюсь, будут проведены в будущем.

Наличие стока талой воды в окружающие моря объясняет, куда девается вода из-под ледника в больших объёмах. В настоящее время слой талой воды можно оценить не более чем в 100—200 м, но, как было замечено в разделе 1.6.7, в соответствии с интерпретацией строения ледника приведённого на рис. 1.12, при прослеживании к северу от станции Восток перестают прослеживаться четыре нижних слоя льда, но они когда-то существовали и суммарная мощность их может составлять почти 700 м, так что же с ними произошло? Если эти слои растаяли, и вода осталась в месте таяния, то мы должны были бы видеть там слой жидкой воды величиной примерно на 530 м больше, чем в районе станции Восток. Но судя по тому, что на радиолокационном разрезе мы не наблюдаем увеличения мощности однородного



Условные обозначения

- | | |
|---|----------------------------|
| сейсмические профили МОГТ | Оси глубоководных каньонов |
| Изобаты, м | раннемиоценовых |
| Скважина глубоководного бурения | современных |
| Средне-позднеоценовый флювиальный конус выноса (авандельта) | |

Рис. 2.2. Наличие подводных каньонов в прибрежных морях Восточной Антарктиды (материалы ПМГРЭ)

слоя (жидкой воды), можно сделать вывод, что она уже выдавлена за пределы депрессии, наверное, частично стекла в окружающие моря, а может быть, стекает и сейчас. Такая же картина пропадания нижних слоёв льда наблюдается и на других радиолокационных разрезах, полученных в Восточной Антарктиде.

Жидкая вода, образовавшаяся за счёт теплового потока Земли под ледником в Восточной Антарктиде под действием давления вышележащих слоёв льда, должна неизбежно выдавливаться из мест её образования и, видимо, стекать в окружающие моря. Такой вывод должен быть ответом на второй вопрос данной главы.

Законы гидростатики позволяют нам разобраться в вопросе образования «озера Восток». Как уже говорилось ранее, у приверженцев его существования имеются два предположения — это «озеро» образовалось до оледенения и смогло просуществовать до настоящего времени как реликтовое и пережило оледенение, или оно образовалось из воды при таянии ледника и стока воды в пониженные участки подлёдного рельефа. Рассмотрим жизнеспособность обоих этих предположений.

2.3. МОЖЕТ ЛИ СОВРЕМЕННОЕ «ОЗЕРО ВОСТОК» БЫТЬ РЕЛИКТОВЫМ, Т.Е. ОБРАЗОВАВШИМСЯ ДО НАЧАЛА ОЛЕДЕНЕНИЯ И ПРОСУЩЕСТВОВАВШИМ ДО НАСТОЯЩЕГО ВРЕМЕНИ?

Чтобы разобраться в этом вопросе, необходимо сначала рассмотреть, как мог идти процесс оледенения в данном районе Антарктиде на его начальном и последующих этапах. Допустим, до начала оледенения здесь существовала структура, которую можно назвать озером, т.е. водоём значительных размеров, соизмеримых с размерами современного «озера Восток» (точнее, депрессии Восток), и который был расположен в пониженном участке рельефа, т.е. депрессии, сложенной как коренными, так и осадочными породами.

Предположение о наличии осадочных пород в депрессии вполне реально, так как геологическая история этого материка весьма продолжительна и на нем вполне могли существовать такие геологические структуры, как депрессии, окружённые горами, и реки, приносящие в существующие в них озёра продукты эрозии в виде осадков. Более подробно существование такой геологической структуры в историческом аспекте рассмотрено в приложении 1, а в дальнейшем будут представлены доказательства правильности таких предположений. А пока попробуем рассмотреть, как такая структура с реликтовым озером будет постепенно переживать стадии оледенения (рис. 2.3). Строение и начальное доледниковое состояние этого реликтового озера показано на рис. 2.3а.

По мнению многих специалистов, оледенение началось с горных вершин, и с этим можно согласиться. Но тогда, по мере накопления на них снега и льда, они начинают спускаться с этих гор в долины и, рассматривая ход оледенения в районе расположения этого древнего озера, в первую очередь необходимо учесть, как развивалось начало этого процесса — покрылась ли его поверхность слоем льда или это произошло позже?

От того, поступает ли снег и лёд с окружающих возвышенностей на не замёрзшую воду озера или на лёд, находящийся на его поверхности, зависит то, как будет развиваться этот процесс в дальнейшем?

Допустим, похолодание наступило резко в течении короткого отрезка времени и водоём уже покрылся сверху слоем льда, и сразу встаёт вопрос: до каких пор он сможет удерживать содержащуюся под ним воду в жидком состоянии, ведь на его поверхность со склонов окружающих его возвышенностей неизбежно будет поступать внешний лёд (рис. 2.3б). Этот поступающий извне лёд обладает определённой массой, т.е. сила его веса будет действовать на озёрный лёд сверху вниз, а значит, в этом направлении он будет оказывать давление на озёрный лёд и находящуюся под ним воду. Мы уже ранее рассматривали соотношения между силой и давлением (см. формулы 1.6 и 1.7 в разделе 1.6.3).

Будем учитывать то, что на начальном этапе внешний лёд будет оказывать давление только на ограниченной площади; обозначим её как S_1 , которая меньше всей оставшейся свободной от этого внешнего льда площади озера S_2 . Если озеро сразу промёрзло до дна, то говорить о наличии в нём жидкой воды нет смысла. Рассмотрим состояние, когда на поверхности уже есть лёд, но под ним ещё существует жидкая вода (рис. 2.3в). Как долго она будет там существовать?

Оледенение продолжается, и на поверхность озёрного льда поступает всё большее количество льда с окружающих возвышенностей (рис.2.3в).

Из законов физики известно, что при статическом равновесии сила веса уравновешивается реакцией опоры. В нашем случае вес внешнего льда, (обозначим его F_1) уравновешивается равной по величине, но противоположной по направле-

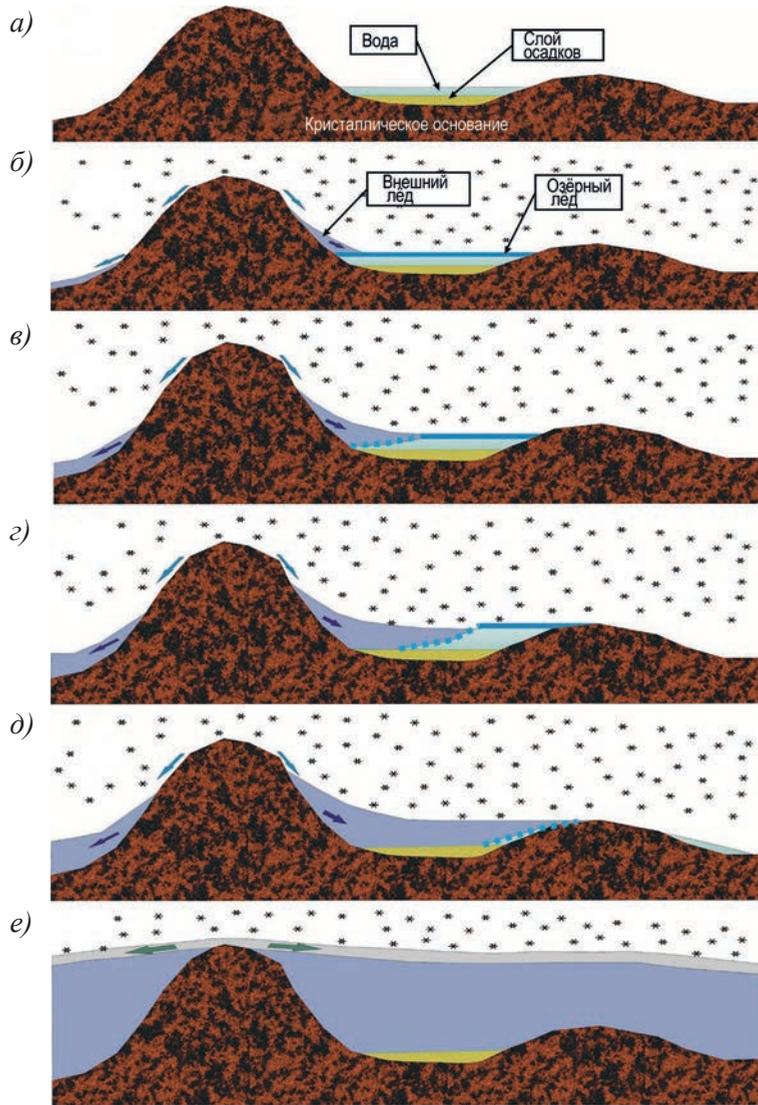


Рис. 2.3. Схема взаимодействия льда и воды в существовавшем водном образовании в виде озера на различных этапах оледенения в Антарктиде: *a* — до начала оледенения; *б* — первоначальный этап оледенения, *в*, *г*, *д* — дальнейший ход процесса оледенения; *е* — завершение начальной стадии оледенения, установление устойчивого покровного ледника в данном районе.

Стрелками показано направление движения снега и льда

нию силой реакции опоры F_2 , и здесь в качестве таковой сначала выступает озёрный лёд, лежащий на поверхности воды. Благодаря своей прочности он в зависимости от толщины может какое-то время выдержать определённый вес внешнего льда, но при увеличении поступающих масс последнего (похолодание продолжается) наступит превышение предела прочности озёрного льда, он начнёт деформироваться, прогибаться и погружаться в воду (рис. 2.3в, г).

Когда озерный лёд уже не будет выдерживать нагрузку внешнего льда, силой сопротивления этому внешнему воздействию будет уже выталкивающая сила, возникающая по закону Архимеда при погружении тела в воду. Величину её можно определить по формуле, аналогичной формуле для силы веса [20]:

$$F_{\text{выт.}} = mg = V\rho g, \quad (2.2)$$

где m — масса вытесненной воды, g — ускорение свободного падения, V — объём вытесненной воды, ρ — её плотность.

Рассмотрим, что будет происходить с водой, которая ранее находилась под слоем озёрного льда, при постепенном увеличении количества поступающего в озеро внешнего льда. Будем учитывать то, что поступающий на поверхность водоёма внешний лёд распределяется на определённой пока ещё небольшой его площади S_1 и давит сверху вниз на озёрный лёд и находящуюся в озере воду с силой F_1 . Если мы допустим, что при значительных размерах существовавшего здесь озера внешний лёд не сразу равномерно покрыл всю его площадь, а только его меньшую часть, то какое-то время будет выдерживаться соотношение: $S_2 \gg S_1$ (рис. 2.3б, в).

В соответствии с законом Паскаля давление в сообщающихся сосудах, которыми в нашем случае являются различные участки озера, передаётся во всех направлениях без изменений. Другими словами, должно выдерживаться условие [22]:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}, \quad (2.3)$$

где F_1 — сила веса внешнего льда, F_2 — сила, действующая на нижнюю поверхность озёрного льда, S_1 — площадь воздействия внешнего льда, S_2 — площадь оставшейся части озера, свободной от внешнего льда.

Из соотношения 2.3 следует, что на оставшейся площади водоёма на нижнюю поверхность озёрного льда будет действовать сила, направленная снизу вверх и равная:

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} \quad (2.4)$$

Из формулы 2.4 следует, что сила, действующая на озёрный лёд снизу вверх, будет настолько больше силы внешнего воздействия, насколько площадь, на которую она воздействует, больше площади воздействия силы веса внешнего льда, т.е. в нашем случае $F_2 \gg F_1$ (закон гидравлической машины).

Под воздействием силы F_2 , действующей снизу-вверх, будет вскрываться озёрный лёд и из-под него на поверхность будет выдавливаться жидкая вода, которая будет либо замерзать, либо вытекать за пределы депрессии. В том и другом случае количество жидкой воды будет уменьшаться (рис. 2.3в, г, д).

Если вода в озере ещё не вся замёрзла, то поступающий извне лёд вместе с озёрным какое-то время будет плавать на поверхности остающейся пока в жидком состоянии воды, и важным становится вопрос, сколько вообще льда может удержать на плаву остающаяся в водоёме вода? По закону Архимеда плавающее на воде тело вытесняет количество воды, равное его весу. В нашем случае этим телом является лёд, и уже не важно, каково его происхождение.

Обозначим в формуле определения выталкивающей силы, которая уравнивает вес льда, плотность воды через ρ_1 и её вытесненный объём как V_1 , а плотность плавающего льда через ρ_2 и его объём через V_2 . В этом случае из условий статического равновесия будет справедливо следующее выражение, вытекающее из формулы 2.2:

$$F_{\text{льда}} = F_{\text{выт.}} = V_1\rho_1 g = V_2\rho_2 g. \quad (2.5)$$

Из выражения 2.5 можно найти возможный максимальный объём воды, который способен удерживать на плаву определённое количество льда:

$$V_1 = V_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (2.6)$$

Таким образом, как следует из формулы 2.6, максимальный объём воды, которая может удерживать на плаву определённое количество льда, может быть меньше максимального объёма льда на величину отношения разности в плотностях льда и воды. При значениях плотности льда 920 кг/м^3 и воды 1000 кг/м^3 это отношение составит примерно 0,92. Таким образом, чтобы на плаву удерживалась какая-то масса льда, необходимо, чтобы она вытесняла количество воды, равное 0,92 от его массы. В противном случае, если этой воды будет меньше, то лёд не будет удерживаться на плаву, т.е. утонет и покоится на каменном основании, а оставшаяся вода будет расположена где-то в виде тонкой прослойки между льдом и каменным основанием (рис. 2.3д).

Заметим, что соотношение 2.6 применимо и к айсбергам, где над водой находится только 0,08 части льда, а под водой его оставшаяся часть (рис. 2.4). Это помогает понять, какое количество вытесненной воды необходимо для того, чтобы удерживать на плаву какую-то массу льда.

При продолжении оледенения в зависимости от первоначальной формы водоёма и объёма воды в нём процесс вытеснения воды из него может идти различно. Если берега водоёма имели небольшую высоту, то при вытеснении воды льдом она сразу начнёт вытекать за его пределы, т.е. от первоначального объёма озера зависит, какое количество льда может оставаться в нём на плаву в течение какого-то времени. В случае, когда водоём находился на дне глубокой замкнутой со всех сторон депрессии, как в рассматриваемом нами случае, то при вытеснении из него воды она будет какое-то время подниматься по стенкам этой геологической структуры, но рано или поздно всё равно начнёт выливаться за её пределы либо замерзать. По аналогии — в более глубоком стакане с водой поместится большее количество льда (прежде чем вода начнёт из него выливаться), чем в мелком с таким же количеством воды.

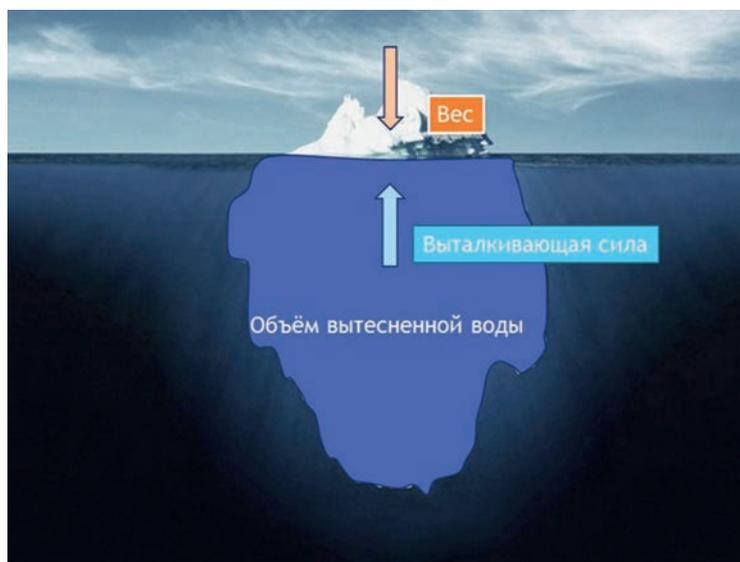


Рис. 2.4. Соотношение между весом льда и объёмом вытесненной воды на примере айсберга

Понятно, что мелкие водоёмы в виде рек и мелких озёр исчезнут в первую очередь, а более крупные или расположенные в крупных отрицательных структурах каменного основания исчезнут позже, как только в них поступит количество льда, более чем на 10 % превышающее объём находящейся в этих структурах воды, а это неизбежно наступит, если процесс оледенения продолжится в течение длительного времени (рис. 2.3e).

Такие предположения говорят о том, что вряд ли реликтовые водоёмы смогли просуществовать до нашего времени. Это может быть ответом на третий вопрос данной главы. Если у приверженцев общепринятой гипотезы есть другое мнение, пусть они её выскажут.

Нужно отметить, что находившиеся на дне озера осадки в ходе этого процесса изменятся незначительно и осадочное образование, если оно существовало в то время под слоем воды, благополучно переживёт этот этап практически без изменений и имеет шанс просуществовать до нашего времени (см. рис. 2.3d, e).

Вопрос, связанный с возможностью формирования подледникового озера из воды, образованной при таянии льда, необходимо рассматривать тоже в соответствии с Законом Архимеда. Попробуем это сделать.

2.4. МОГЛО ЛИ ПОДЛЕДНИКОВОЕ ОЗЕРО ОБРАЗОВАТЬСЯ ИЗ ВОДЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ ТАЯНИИ ЛЬДА?

Ответить на этот вопрос можно очень просто: достаточно ещё раз взглянуть на рис. 2.4 и вспомнить, какая масса льда находится в пределах депрессии Восток. Для того чтобы подледниковое озеро образовалось из воды растаявшей нижней части ледника, необходимо, чтобы этой воды, в соответствии с законом Архимеда, было достаточно хотя бы для удержания льда на плаву, не говоря уже о том, что за счёт выталкивающей силы она постепенно поднимала вышележащий слой льда на величину, равную современному водному слою, а по версии приверженцев общепринятой гипотезы — это около 1 000 м. Не буду тратить время на объяснения этого, надеюсь, они нам всё объяснят. Некоторые из них даже сравнивают ледник, находящийся в пределах депрессии Восток, с шельфовым ледником. Смею их заверить, что это невозможно по той же причине — отсутствию достаточной выталкивающей силы, скорее лёд выдавливает эту воду за пределы структуры, но уже в соответствии с законами гидродинамики.

Итак, подледникового озера в районе станции Восток, скорее всего, нет. Но если не озеро, то что? Рассмотрим это в дальнейшем в одной из следующих глав.

Дальше можно рассмотреть, какие механические процессы происходят в леднике, а именно: его движение в вертикальном и горизонтальном направлениях.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ЛЕДНИКЕ ВО ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ И ОКРАИННЫХ ЧАСТЯХ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

Рассматривая механические процессы в леднике, нужно в первую очередь определить, движется ли ледник не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлении. В настоящее время в публикациях нет упоминаний о вертикальном движении льда, но приводится масса сведений о его горизонтальном движении.

Считаю необходимым рассмотреть и то и другое. При таком рассмотрении, опираясь на законы физики, необходимо определить, за счёт какой энергии происходит движение, как ведут себя массы льда в той или иной ситуации и как то или иное движение может иметь подтверждение на радиолокационных разрезах. И опять мы можем задать себе целый ряд вопросов, ответами на которые будет подробное рассмотрение различных аспектов механических процессов, происходящих в леднике Восточной Антарктиды.

1. Существует ли вертикальное движение льда, и как оно может быть связано с донным таянием?

2. Как может быть определена скорость донного таяния по радиолокационным данным?

Ответив на них, необходимо будет тщательно проанализировать целый ряд вопросов, связанных с горизонтальным движением ледника. На этот счёт у приверженцев общепринятой гипотезы есть масса предположений, которые требуют проверки.

Начать изучение механических процессов в леднике можно с рассмотрения вертикального движения льда, а для этого необходимо учитывать как наличие донного таяния, так и взаимодействие льда и воды, приведенные в предыдущих главах.

3.1. ВЗАИМОСВЯЗЬ ДОННОГО ТАЯНИЯ И ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛЬДА

При рассмотрении процесса донного таяния необходимо учитывать, что при переходе воды из твёрдого состояния в жидкое высвобождается примерно 9 % объёма. При этом неважно, с какой скоростью этот переход происходит: идёт ли он в настоящее время или протекал в далёком прошлом. Вряд ли при этом ледник повисает над этим высвободившимся пространством, скорее всего, он как вещество пластичное под действием собственного веса *опускается вниз* или *погружается*. Вполне естественно, что при этом изначально выровненная дневная поверхность также прогибается вниз и в такие места возможен приток льда из окружающих возвышенных областей, а это, в свою очередь, приводит к увеличению мощности слоя льда, накапливающегося в таких местах относительно окружающих возвышенностей. В пониженных участках рельефа льда в течение времени накопится больше, чем в окружающих возвышенных областях.

За время оледенения, которое по различным оценкам могло длиться десятки миллионов лет, процессы донного таяния и связанного с ним погружения ледника могли происходить в течение длительного времени, и там, где таяние было более интенсивно, ледник погружался на большую глубину, а в местах с положительными формами рельефа, т.е. на поднятиях, ледник или погружался с небольшой скоростью, или вообще не погружался, а растекался от такого своеобразного «ледораздела» по разные стороны от него.

Если такое вертикальное движение льда сверху вниз существует, попробуем определить, можно ли на радиолокационных разрезах найти подтверждения этому и даже посчитать скорость такого вертикального движения.

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЛИЧИЯ И СКОРОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛЬДА НА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ РАЗРЕЗАХ

Будем искать подтверждение высказанных здесь предположений о связи различных условий таяния льда с рельефом каменного основания и поведением ледника на имеющихся в нашем распоряжении радиолокационных разрезах. Прежде чем переходить к их рассмотрению, необходимо сделать одно важное замечание: — все приводимые здесь радиолокационные разрезы получены в Восточной Антарктиде, поэтому и поиск ответов на поставленные вопросы в данной работе касаются этой области Земли.

Проанализируем поведение ледника на примере участка с хорошо выраженными перепадами высот каменного основания и полученного в таком месте радиолокационного разреза (рис. 3.1). При анализе будем придерживаться высказанных ранее предположений об определении на радиолокационных разрезах границы между льдом и водой, а также между водой и каменным основанием (см. раздел 1.6.4).

На рис. 3.1 показаны точки от 1 до 5, нанесённые на различных участках профиля, поведение ледника в которых мы рассмотрим более подробно. Первое, что мы наблюдаем на этом, да и на других аналогичных радиолокационных разрезах, это то, что слой льда с хорошо выраженной слоистостью практически повторяет рельеф каменного основания, а слой жидкой воды (однородный слой на разрезе) меняется от значительных величин в пониженных участках рельефа (на рис. 3.1 точки 1 и 3) до практически нулевого значения в точке 5.

Изменение мощности однородного слоя на этом разрезе в очередной раз подтверждает высказанные ранее предположения о неравномерном поступлении тепла и, соответственно, о неравномерном таянии нижней поверхности льда (см. раздел 1.6.6).

Для нас сейчас важным является то, как неравномерное поступление тепла и, в соответствии с этим, неравномерное донное таяние отражаются на слоистой части ледника, а именно, почему отдельные слои погружены на различную глубину относительно дневной поверхности. Мы уже предположили ранее, что отдельные хорошо выраженные слои в леднике могут быть изохронными поверхностями, которые когда-то в разные периоды формирования ледника были поверхностями дневными.

Вполне вероятно, что ранее дневная поверхность по мере заполнения льдом неровностей рельефа была более или менее выровненной, значит, наблюдаемая сейчас картина положения этих древних дневных поверхностей связана с их погружением. Такое постепенное выравнивание бывших дневных поверхностей по мере уменьшения их глубины заметно также на рис. 1.13 и 2.1.

Для анализа того, как погружение слоёв льда на различную глубину относительно дневной поверхности, т.е. движение льда вертикально вниз под действием собственного веса, связано с донным таянием, выделим на временном разрезе какой-нибудь временной интервал, в течении которого происходило формирование одних и тех же слоёв ледника (метки «а» на рис. 3.1).

В районе, где получен этот радиолокационный разрез, специальных исследований по определению возраста льда на различной глубине не проводилось. Для приближённых расчётов можно воспользоваться опубликованными данными, полученными при прослеживании изохронных поверхностей от района станции Восток к побережью, показанными на рис. 3.2 и 3.3.

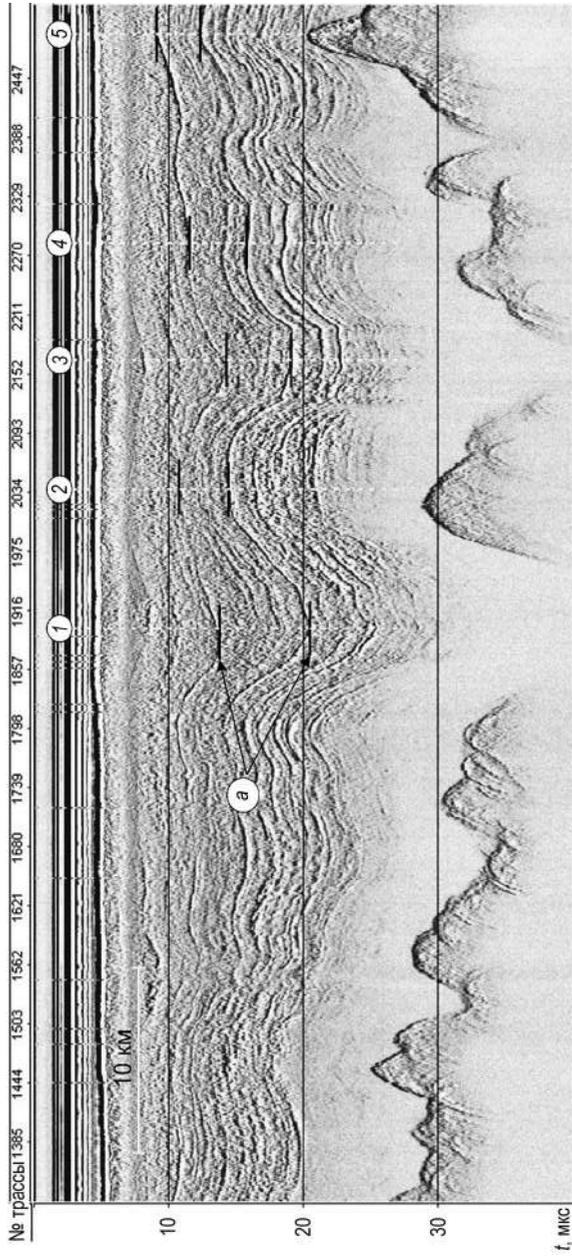


Рис. 3.1. Фрагмент радиолокационного маршрута, полученного в районе Принцессы Елизаветы, с хорошо выраженным рельефом каменного основания (материалы ФГУНПП «ЦМГРЭ»). *a* — характерные хорошо прослеживаемые изохронные поверхности. Цифрами 1—5 обозначены участки, на которых производился анализ поведения ледника.

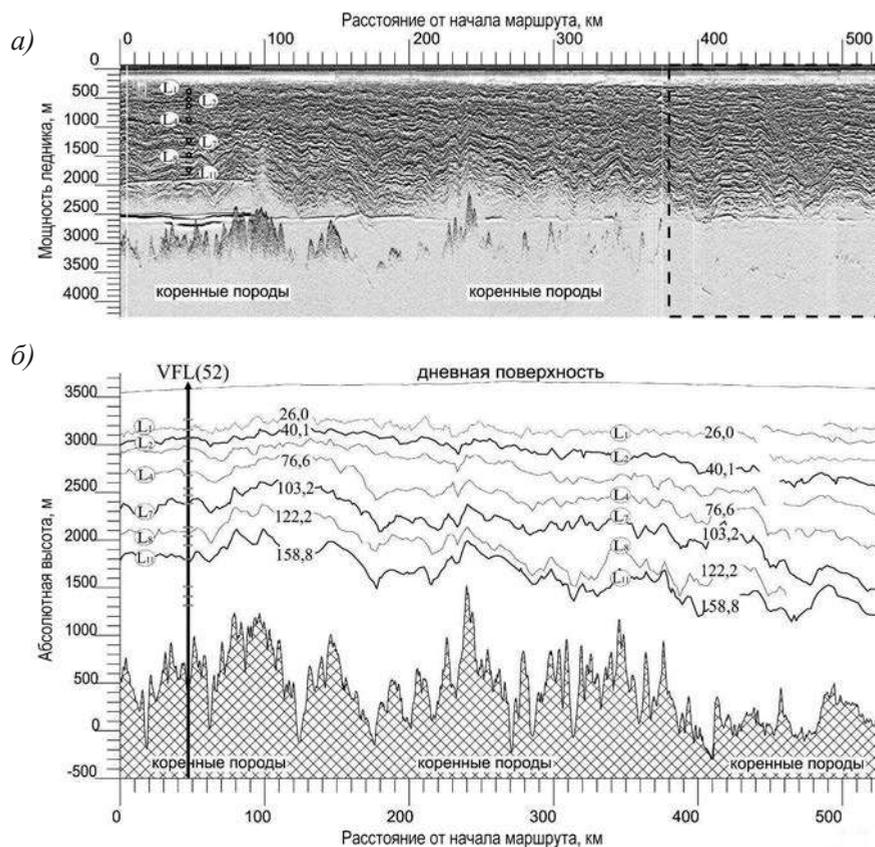


Рис. 3.2. Прослеживание изохронных поверхностей от района станции Восток в направлении станции Прогресс по С.В. Попову (материалы ФГУНПП «ПМГРЭ»)

В соответствии с приведённым прослеживанием изохронных поверхностей возраст льда в районе, где получен радиолокационный разрез, показанный на рис. 3.1, может составлять от 26 тысяч лет в верхней части слоистой зоны до 103 тысяч в основании этой зоны. Таким образом, лёд здесь накапливался в общей сложности в течение примерно 77 тыс. лет.

При таких значениях возраста льда временной интервал накопления слоёв льда между выделенными изохронными поверхностями (метки «а» на рис. 3.1) можно оценить в 23,5 тысячи лет.

Определить мощность этого слоя в различных точках на профиле можно по формуле [13]:

$$\Delta h = \frac{v\Delta t}{2}, \quad (3.1)$$

где Δh — мощность выделенного слоя льда между метками, v — скорость распространения электромагнитных волн во льду, Δt — временной интервал между метками на радиолокационном разрезе в микросекундах.

При расчётах мощности слоёв льда для каждого выделенного участка 1—5 будем использовать приводимую в публикациях скорость распространения электромагнитных волн во льду, равную 168 м/мкс [38]. Полученные по формуле 3.1 зна-

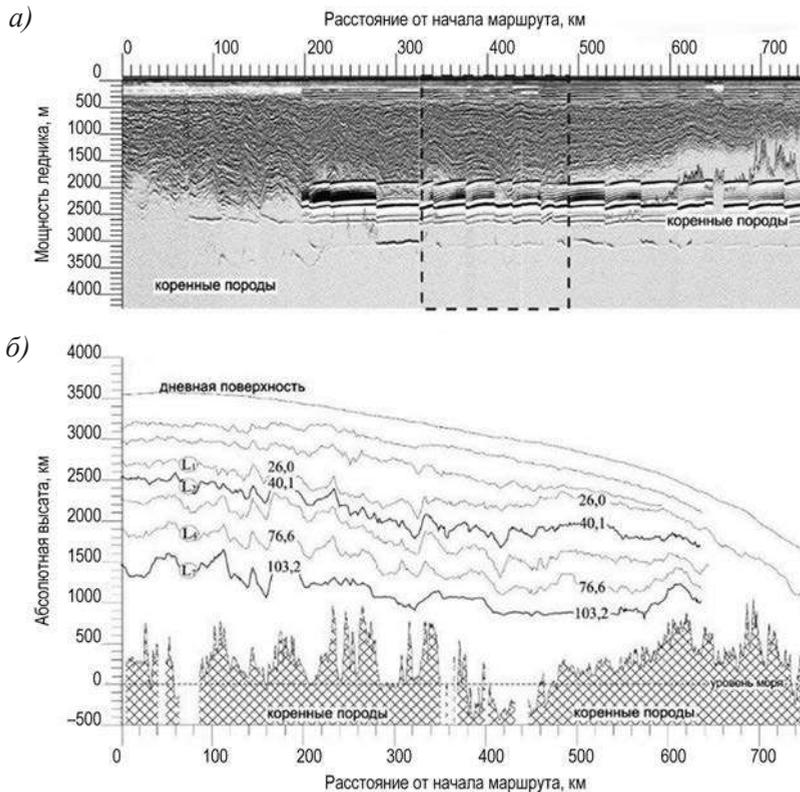


Рис. 3.3. Прослеживание изохронных поверхностей от района станции Восток в направлении станции Прогресс по С.В. Попову (материалы ФГУНПП «ПМГРЭ»), продолжение маршрута, приведённого на рис. 3.2

Таблица 3.1

Расчётные значения скорости донного таяния в контрольных точках 1—5

№ расчётной точки	Δt , мкс	Мощность слоя льда Δh , м	Разность относительно точки 5 (ΔH), м	Скорость донного таяния для временного интервала 23,5 тыс. лет, (мм/год)
1	6,4	540	246	10,47
2	3,8	321	27	1,16
3	4,8	403	109	4,63
4	4,1	348	54	2,29
5	3,5	294	0	0

чения мощности слоя льда в точках 1—5 (Δh) приведены в табл. 3.1. В таблице значения Δt для расчётов мощности слоя льда в точках 1—5 по формуле 3.1 замерены непосредственно на временном разрезе.

Прежде чем производить дальнейшие расчёты, рассмотрим ещё одно предположение.

На приведённом на рис. 3.1 фрагменте временного разреза заметно, что в точке 5 практически отсутствует однородный слой, что, видимо, говорит о том, что здесь в районе поднятия каменного основания количество поступающего тепла недостаточно для донного таяния. Значит, здесь ледник не погрузился и накопленный

слой льда должен быть меньше, чем в тех областях, где таяние присутствовало и где ледник погружался с какой-то скоростью. Это предположение подтверждается тем, что расстояние по времени между метками здесь минимально относительно других маркирующих точек. Таким образом, разность в мощностях слоёв льда, накопленных за один и тот же период времени, может в какой-то степени определять величину донного таяния, а значит, и скорость движения льда сверху вниз. Такой подход позволяет нам считать скорость погружения в области 5 за счёт донного таяния равным нулю и относительно этой области посчитать скорости погружения льда в других областях (1—4), а это, в свою очередь, позволит оценить и скорость донного таяния ($v_{д.т.}$) в них. Такие расчёты для каждой точки можно произвести по формуле:

$$v_{д.т.} = \frac{\Delta H}{t}, \quad (3.2)$$

где ΔH — разница в мощности слоёв льда на выбранных участках относительно точки 5, t — время, в течение которого накапливался слой льда (временной отрезок между двумя изохронными поверхностями).

Как уже говорилось ранее, временной отрезок между метками «а» для всех рассматриваемых участков равен 23,5 тыс. лет. Расчёты полученных значений скорости донного таяния относительно точки 5, где по принятым нами условиям оно равно нулю, приведены также в табл. 3.1.

Как и следовало ожидать, над пониженными участками рельефа (см. расчётные точки 1 и 3 на рис. 3.1 и полученные в них значения в таблице) скорость донного таяния оказалась выше относительно других расчётных точек, что говорит о более интенсивном ходе этого процесса в них за счёт фокусировки теплового потока с боковых наклонных поверхностей каменного основания и меньшего расстояния до глубинного источника тепла и наоборот — над поднятиями скорость донного таяния ниже.

Изменение значений скорости донного таяния в рассматриваемых точках вполне обоснованно и позволяет предположить, что неравномерное таяние нижних слоёв льда объясняет существование в различных районах вертикального движения ледника сверху вниз с различной скоростью, что приводит к постепенному неравномерному погружению основной массы ледника и образованию в средней слоистой зоне *синклиналиных складок* различной интенсивности.

Если перейти к геологической структуре в районе станции Восток, т.е. к депрессии Восток, то можно убедиться, что в пределах этой отрицательной структуры погружение льда также существует и оно так же не одинаково. На рис. 3.4 представлен рельеф нескольких характерных поверхностей над этой структурой, построенных автором по данным американских аэролокационных исследований LVS, практически охвативших всю эту структуру [50].

Все поверхности построены в одном вертикальном масштабе. Поверхность «А» построена по первой хорошо прослеживаемой границе от поверхности слоистой зоны, хорошо различимой на радиолокационных разрезах в районе станции Восток на глубине около 700 м. Отдельно рельеф этой поверхности представлен на рис. 3.5, и, судя по его форме, существует хорошо выраженное погружение льда в этом районе как раз различной интенсивности, т.е. с различной скоростью, но без заметного горизонтального сдвига. Погружение льда минимально над поднятиями каменного основания и существенно больше в остальных местах, особенно возле западного борта структуры.

Максимальная скорость погружения льда, а значит, и донного таяния наблюдается на северо-западе структуры. Характерно то, что рельеф поверхности «А» и подошвы ледника здесь также повторяют рельеф подстилающего каменного осно-

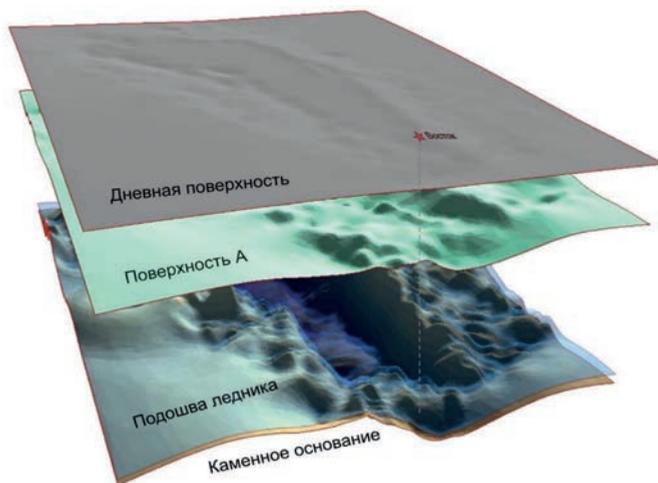


Рис. 3.4. Поверхности в ледниковом покрове и рельеф подстилающего каменного основания над депрессией Восток

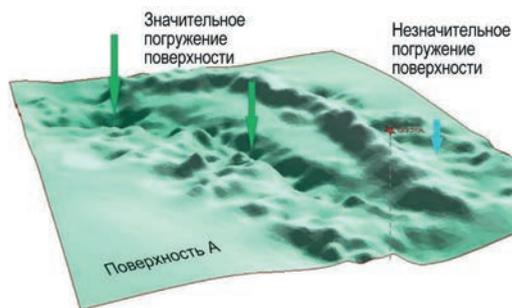


Рис. 3.5. Рельеф промежуточной поверхности «А» в ледниковом покрове над депрессией Восток

вания, т.е. не имеет горизонтального сдвига, что замечается практически на всех радиолокационных разрезах, а это может свидетельствовать об отсутствии горизонтального движения льда в основной своей массе, что будет подробно рассмотрено в следующем разделе.

При построениях, приведённых на рис. 3.4, учитывалось наличие водной прослойки между подошвой ледника и каменным основанием. Её мощность определялась по мощности однородного слоя на радиолокационных разрезах и скорости распространения электромагнитных волн в воде 33 м/мкс. Более подробно анализ радиолокационных данных и расчёты по ним приведены в Приложении 2.

Если посмотреть на спутниковый снимок рельефа дневной поверхности, полученный над депрессией Восток, но уже с учётом высказанных здесь предположений, то можно заметить как раз хорошо выраженное погружение дневной поверхности в данном районе, но только в пределах самой структуры без горизонтального сдвига (рис. 3.6).

Завершая рассмотрение вертикального движения ледника и связь его с донным таянием, можно высказать вполне обоснованное предположение, что такое движение существует и оно однозначно связано с донным таянием, и не важно, существует

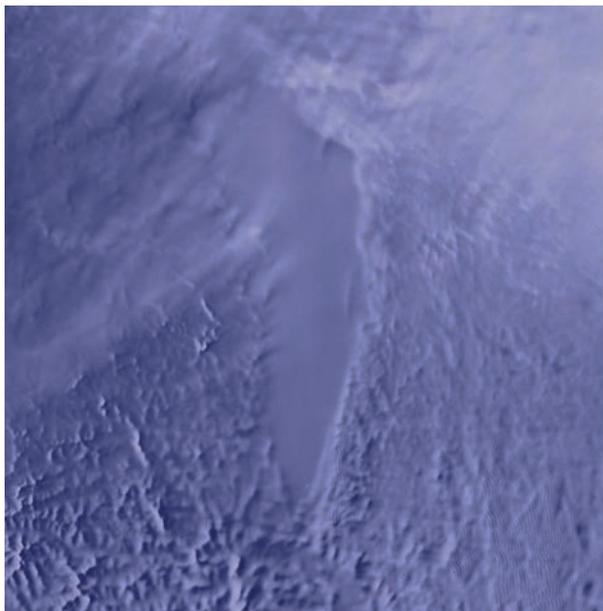


Рис. 3.6. Спутниковый снимок рельефа дневной поверхности над депрессией Восток [18]
(повёрнуто на 90° против часовой стрелки)

ли таковое в настоящее время или происходило только в прошлом. Подтверждение этому мы можем увидеть практически на всех радиолокационных разрезах, полученных во внутриконтинентальных областях Восточной Антарктиды, так как на них везде в слоистой зоне ледника присутствуют синклиналильные структуры, образование которых происходит как раз за счёт таяния нижней поверхности ледника, а их амплитуда определяет его скорость.

В связи с неравномерным таянием нижней поверхности ледника можно сделать одно важное замечание, касающееся вопроса, где может находиться более древний лёд. По опубликованным данным при бурении льда на станции Восток, максимальный его возраст был определён в 422,8 тыс. лет (см. табл. 1.2), а при бурении на станции «Конкордия» на куполе «С» на глубине 3 200 м исследователям удалось получить колонку льда, сформировавшегося в течение гораздо более длительного срока — 800 тыс. лет. Бурение было прекращено, когда бур почти достиг скального основания купола [52]. При бурении на станции Восток на такой же примерно глубине — 3 231 м — возраст льда определён как 378 тыс. лет (см. табл. 1.2).

Чем объясняется такая разница в возрастах льда на одной и той же глубине? Если учитывать таяние нижней поверхности льда в разных условиях, то сразу станет понятно, что, если на куполе «С» на этой глубине уже было достигнуто скальное основание купола, значит, там лёд такой мощности лежит на каменном основании, причём в отличие от скважины на станции Восток вода в скважину не поднималась. Это говорит о том, что там на подлёдном куполе практически нет условий для донного таяния, о чём говорилось ранее, а значит, и более древний лёд необходимо искать на поднятиях каменного основания либо вблизи от них, где его более древние слои не разрушаются при таянии.

В следующем разделе рассмотрим горизонтальное движение ледника, которое вызывает наибольшее количество вопросов к приверженцам общепринятой модели строения и поведения ледникового покрова Антарктиды.

3.3. ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЛЕДНИКА

Не будем приводить здесь все предположения (именно *предположения*) о горизонтальном движении ледника в Антарктиде, их можно найти в массе публикаций и в Интернете. В основном они сводятся к тому, что лёд движется (растекается) под собственным весом, движется всей своей массой в определённом направлении, и скорость его движения увеличивается от внутриконтинентальных районов к прибрежным. Необходимо заметить, что эти предположения основываются в основном на измерениях скорости движения льда только на его поверхности или на незначительной глубине (натурные исследования измеренных скоростей будут приведены далее). Сведений об измерениях скорости движения льда в глубинных слоях ниже 500 метров в общем доступе пока нет. В публикациях можно встретить такую теоретическую модель, поясняющую строение ледника и его движение по версии приверженцев общепринятой модели строения ледника Антарктиды (рис. 3.7).

Приведённая на этом рисунке модель по-своему интересна, поэтому рассмотрим на ней несколько важных для дальнейшего обсуждения моментов, но при этом по-

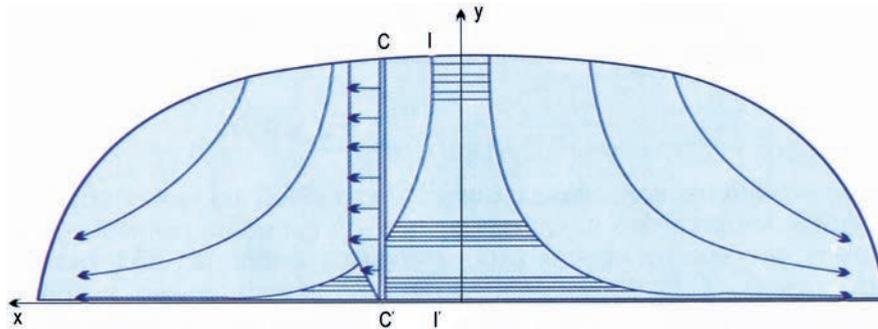


Рис. 3.7. Одна из теоретических общепринятых моделей строения ледника в Антарктиде и его горизонтального, и вертикального (?) движения [21].

I, Г' — область лёдораздела, С, С' — вертикальный профиль горизонтальной составляющей скорости движения льда (пояснения к рисунку из оригинала).

ставим к этой модели и несколько вопросов. Она подразумевает в центре наличие слоистой среды, видимо, по наличию таковой на радиолокационных разрезах. Эта область на модели строго горизонтальна (?), не искажена (?) и неподвижна. Существует поверхность несогласия между нею и движущейся частью ледника по бокам (?). Векторы движение льда показывают сначала его движение сверху вниз (?), затем движение переходит в горизонтальное. Однако приведённые слева от вертикальной оси векторы скорости показывают только её горизонтальную составляющую без вертикальной (?). Эти векторы свидетельствуют, видимо, о том, что скорость движения практически одинакова для всех верхних слоёв льда, а уменьшение (?) горизонтальной составляющей происходит только в непосредственной близости к основанию, что не соответствует величине стрелок, которые должны характеризовать движение (?) отдельных частичек льда относительно каменного основания, которое, кстати, на модели совершенно ровное, чего не может быть в реальных условиях.

Стрелки или векторы, показывающие само движение льда по обеим сторонам от неподвижной области, имеют сначала только вертикальную составляющую, которая, кстати, нигде в публикациях не упоминается и которая, в этой модели по каким-то неизвестным причинам, переходит затем в горизонтальную составляющую, которая имеет различную величину на разной глубине. Горизонтальная составляющая

движения по мере приближения к основанию увеличивается. К сожалению, на этой модели не представлены горизонтальный и вертикальный масштабы, поэтому трудно судить о величинах как векторов движения, так и о величинах самих зон с отсутствием и наличием движения. Видимо, у приверженцев общепринятой модели преобладает именно такое представление о строении ледника и о процессах, происходящих в нём.

В дополнение к этой модели можно привести гипотетические предположения о строении ледника в районе станции Восток, которые широко представлены в Интернете (рис. 3.8). Эта модель показывает наличие «озера Восток» и движение ледника над ним.

Красные стрелки вниз и вверх на рис. 3.8 являются ничем не доказанными предположениями приверженцев общепринятой модели строения ледникового по-

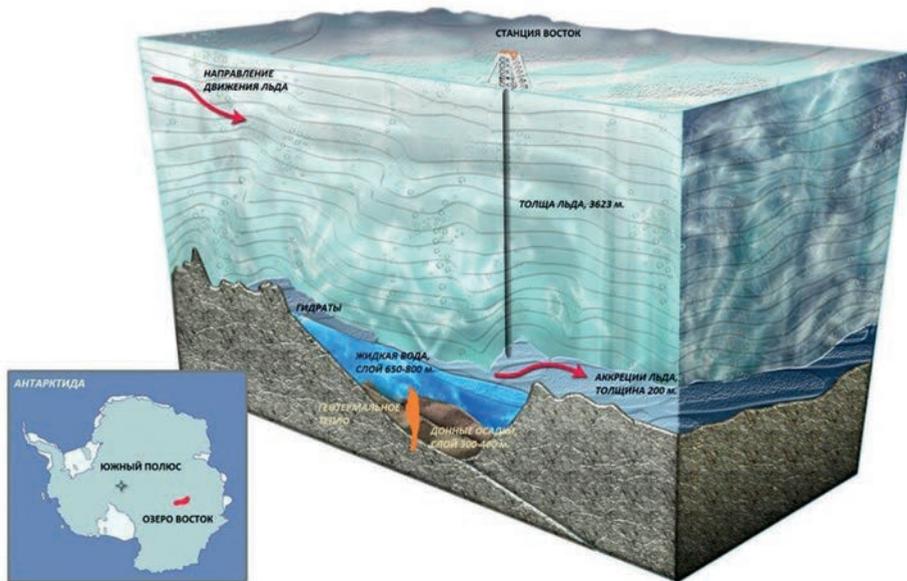


Рис. 3.8. Общепринятая модель строения «озера Восток» и предполагаемое ею движение льда над ней [41]

крова Антарктиды о вертикальном и горизонтальном движении льда. Нарисовать красные стрелки сверху-вниз (слева вверху) и снизу-вверх (внизу справа на модели) очень просто, но на основании чего они нарисованы? Как за счёт чего здесь ледник движется и, более того, сначала опускается, затем поднимается на уступ каменного основания, если нижняя поверхность ледника здесь расположена ниже уровня моря и потенциальная энергия его отрицательна? (см. рис. 1.13).

Необходимо отметить, что горизонтальный масштаб на представленном рисунке, да и на всех моделях, предлагаемых их приверженцами, сильно сжат по отношению к вертикальному. Реальное строение структуры мы рассмотрим в одной из следующих глав.

К представленной на рис. 3.8 модели есть ещё один вопрос, уже не связанный с движением, но он отражает ещё одно предположение авторов данной модели — что за однородный слой находится справа и слева между каменным основанием и ледником? Неужели это тот самый *конжеляционный* или *озёрный лёд*, который образовался из озёрной воды? Но почему он находится за пределами «озера»? Мы уже

разобрали этот вопрос (см. раздел 1.6.5), но, видимо у приверженцев общепринятой модели есть и своё объяснение этому. С интересом его рассмотрим, а пока вернёмся к горизонтальному движению ледника.

С точки зрения законов физики и здравого смысла, в связи с такими представлениями необходимо задать их авторам и самим попытаться ответить на несколько вопросов:

1. При каких условиях и за счёт какой энергии возникает горизонтальное движение льда, заставляющее его двигаться в определённом направлении и с различной скоростью? Как нижние слои ледника определяют направление движения?

2. Если мы действительно наблюдаем движение льда на поверхности, то как глубоко в сам ледник оно распространяется, и может ли существовать неподвижная в горизонтальном направлении зона в леднике?

3. В связи с этим, будет ли существовать во льду поверхность скольжения или несогласия между неподвижной нижней слоистой и подвижной верхней зонами, как на рис. 3.7?

4. Как, по их мнению, при движении нижних слоёв льда они преодолевают встретившиеся на его пути препятствия?

5. Чем замещается смещённая в определённом направлении масса льда?

На все эти вопросы необходимо найти ответы, причём такие, которые не противоречили бы основным законам физики: закону сохранения энергии и закону сохранения масс, а также и здравому смыслу. Попробуем ответить на них и для начала рассмотрим самый первый: при каких условиях и за счёт какой энергии ледник может двигаться горизонтально?

3.3.1. Условия возникновения горизонтального движения льда и изменения скорости его движения

Из курса физики нам известно два вида механической энергии: потенциальная ($E_{п.}$) и кинетическая ($E_{к.}$). Первая характеризует энергию, которой обладает тело, поднятое над Землёй на определённую высоту. При определённых условиях эта энергия может переходить в кинетическую энергию движущегося тела, причём общее количество энергии (E) при таком переходе должно оставаться неизменным, что выражается следующей зависимостью [16]:

$$E = E_{п.} + E_{к.} = mgh + \frac{mv^2}{2} = const, \quad (3.3)$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения, h — высота нахождения тела относительно точки, где его энергия минимальна, v — скорость движущегося тела.

В рассматриваемом нами случае потенциальной энергией обладает лёд во внутриконтинентальных областях, находящийся на поверхности ледника за счёт того, что он поднят над уровнем моря на определённую высоту. Его потенциальная энергия станет минимальной на уровне моря, если он до него доберётся. Нижележащие слои льда по мере увеличения расстояния от поверхности обладают всё меньшим количеством потенциальной энергии, а находящиеся ниже уровня моря вообще отрицательной. Теперь остаётся разобраться, при каких условиях потенциальная энергия льда перейдёт в кинетическую его движения.

Не будем глубоко погружаться в теорию сдвиговых деформаций, просто рассмотрим какой-то объём льда, находящийся на значительном удалении от побережья и дневной поверхности. Учитывая реальные размеры ледника, нет смысла рассматри-

вать взаимодействие кристаллов льда между собой, пусть таким объёмом будет 1 м^3 , учтём, что во всех направлениях он окружён такими же и количество их огромно как по горизонтали, так и по вертикали. На всех на них действует только одна сила — сила веса и практически каждая из этих частиц льда находится в одинаковых условиях и воздействие сдвига на неё со стороны соседних в каком-то определённом направлении (в направлении к побережью?) будет противоречить здравому смыслу. Возвращаясь к рис. 3.7 и 3.8 нужно представлять реальные масштабы таких моделей. Получается, что для льда находящегося на какой-то глубине нет условий для возникновения горизонтального смещения его в определённом направлении, говоря научным языком — нет условий для возникновения горизонтальной составляющей силы веса.

Опять же из курса физики известно, что такими условиями обладает наклонная плоскость. На ней за счёт угла наклона образуется горизонтальная составляющая силы веса тела, которая и является причиной возникновения горизонтального движения в сторону наклона плоскости при условии преодоления телом сил трения. От величины угла наклона этой плоскости зависит величина горизонтальной составляющей, т.е. скорости движения или ускорения и силы трения. Если ось X направить вдоль наклона поверхности, то характер такого движения можно описать формулой [17]:

$$ma_x = mg \sin \alpha - kmg \cos \alpha, \quad (3.4)$$

где m — масса тела, a_x — ускорение вдоль оси X (вдоль склона), g — ускорение свободного падения, α — угол склона плоскости относительно горизонта, k — коэффициент трения или сопротивления движению.

Выражение 3.4 состоит из двух частей: величины горизонтальной составляющей силы веса и величины силы сопротивления движению, возникающей за счёт трения и направленной в противоположную сторону. В соответствии с этим, движение возникнет только тогда, когда для определённой массы тела величина горизонтальной составляющей превысит по величине силу трения, причём при увеличении угла наклона ускорение увеличивается, а сила трения уменьшается. Этим хорошо объясняется увеличение скорости движения верхних слоёв льда в Антарктиде — от нуля на лёдодорожках до сотен и даже до первой тысячи метров в год при приближении к побережью, что происходит за счёт увеличения угла наклона дневной поверхности (рис. 3.9).

Натурных измерений скорости движения глубинных слоёв льда практически нет. Имеется, пожалуй, единственная опубликованная работа, посвящённая этому и затрагивающая движение в верхнем слое ледника [33]. В данной работе приводятся в виде графиков результаты измерений скорости и направлений движения приповерхностных слоёв ледника. В опубликованные в этой работе графики мною внесены некоторые дополнения, а именно: — внизу добавлены шкалы скорости движения льда относительно неподвижного каменного основания, которые являются просто обратными величинами скорости относительно дневной поверхности (рис. 3.10).

Приведённые на рис. 3.10 графики говорят нам о многом. Так, по мере приближения к побережью скорости движения верхнего слоя льда заметно увеличиваются, однако для нас более важным является то, что с глубиной скорость движения льда относительно неподвижного каменного основания уменьшается и во внутриконтинентальных районах на глубине около 500 м она становится практически равной нулю. В районе станции Мирный она будет равна нулю на несколько большей глубине.

Это лишний раз подтверждает высказанное ранее предположение о том, что при увеличении угла наклона возрастает скорость движения и в процесс, видимо, вовлекаются более глубоко залегающие слои льда. Одновременно из этих графиков

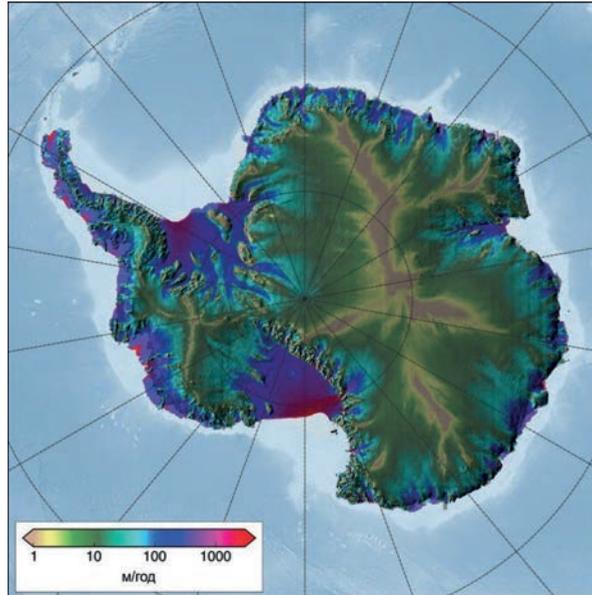


Рис. 3.9. Рельеф дневной поверхности и изменение скорости движения (м/год) верхней части ледникового покрова Антарктиды ([51] с изменениями)

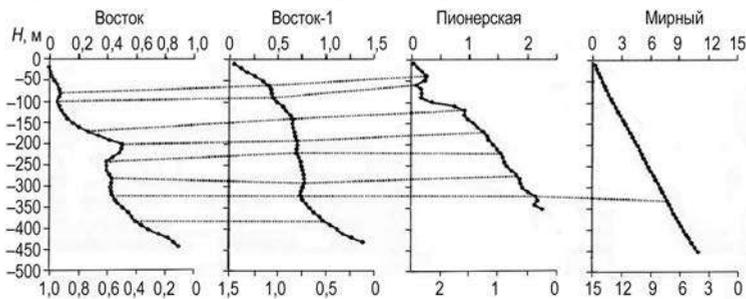


Рис. 3.10. Naturные измерения скорости движения льда на различной глубине относительно дневной поверхности (верхняя шкала) и неподвижного каменного основания (нижняя шкала) ([33] с изменениями и дополнениями)

следует то, что на какой-то глубине горизонтальная скорость движения льда становится равной нулю. Рассмотрим это более подробно.

Уменьшение скорости с глубиной подтверждает то, что условий для возникновения горизонтального движения глубинных слоёв ледника нет, о чём говорилось ранее. Откуда эти глубинные слои льда знают, в каком направлении им нужно двигаться? Что толкает их в определённом направлении? На эти вопросы могут ответить только приверженцы общепринятой гипотезы.

Ответом на первый вопрос данной главы может быть такой: ледник движется горизонтально только в своей верхней части за счёт наклона дневной поверхности, на какой-то определённой глубине он должен быть неподвижен, иначе нарушается закон сохранения энергии (как соблюдается закон сохранения масс, рассмотрим в дальнейшем). И здесь можно переходить ко второму вопросу, т.е. рассмотреть, может ли движение, существующее на поверхности, вовлекать в этот процесс все нижележащие слои льда или только какую-то их часть?

3.3.2. Почему уменьшается скорость горизонтального движения в леднике?

Если горизонтальная скорость движения льда с глубиной уменьшается, то важно понять, почему это происходит? Для этого обратим внимание на вторую часть выражения 3.4, так как в нашем случае при вовлечении в движение нижних слоёв льда увеличивается перемещаемая масса, а значит, увеличиваются и силы трения, и, рано или поздно, величина силы трения станет соизмеримой с величиной горизонтальной составляющей, т.е. величина ускорения при определённой массе и определённом угле наклона дневной поверхности вообще станет равной нулю.

В рассматриваемом нами случае силой трения является такое свойство текучих веществ (сюда можно отнести лёд), как внутреннее трение. Из курса физики известно, что при ламинарном течении жидкости в трубе скорость потока у неподвижного основания (стенки, ограничивающей поток) равна нулю. То есть скорость потока от центра к неподвижной периферии как раз постепенно уменьшается за счёт внутреннего трения в движущейся жидкости, которое в ней будет существовать всегда пока она течёт. В нашем случае для движущегося льда центром потока будет дневная поверхность, где его скорость максимальна, а неподвижной стенкой будет нижняя часть ледника, расположенная на какой-то глубине относительно дневной поверхности. Только в этом случае в леднике Антарктиды будут соблюдаться законы механики.

Как уже говорилось ранее, дополнительным подтверждением предположения, что основная масса льда неподвижна, может служить наблюдаемое на радиолокационных разрезах отсутствие горизонтального смещения синклиналиных структур в слоистой зоне ледника от мест их образования.

Значит, на какой-то глубине относительно дневной поверхности ледник неизбежно будет неподвижен, такой вывод можно считать ответом на второй вопрос данного раздела, а между неподвижной и подвижной частями неизбежно будет существовать поверхность несогласия, на которой скорость потока становится равной нулю. Рассмотрим, имеются ли подтверждения этому на имеющихся в нашем распоряжении данных.

3.3.3. Существование во льду поверхности несогласия между слоистой неподвижной нижней и подвижной верхней зонами

Поверхность раздела, существующая в леднике на некоторой глубине, неизбежно должна как-то проявить себя на имеющихся в нашем распоряжении данных натуральных исследований и радиолокационных разрезах.

Если вернуться к имеющимся у нас натурным исследованиям, то по их данным верхняя часть ледника до какой-то глубины ведёт себя несколько странно. Для этой части ледника, к сожалению, нет данных по температуре льда (см. табл. 1.1), поэтому трудно сказать, как изменяется температура во льду в этой части. По данным возрастного анализа, здесь происходит какое-то резкое отклонение в возрасте льда (см. табл. 1.2 и рис. 1.2 и 1.3). Может быть, это как раз связано с различием свойств подвижной верхней и неподвижной нижней частей ледника? Чтобы выяснить это, потребуется более тщательный анализ свойств верхней его части, для чего, возможно, потребуется проведение дополнительных натуральных исследований.

При анализе же радиолокационных разрезов мы как раз наблюдаем хорошо выделяемую поверхность несогласия между верхней зоной, в которой явно выраженная слоистость отсутствует, и нижней с уже хорошо выраженной слоистостью (см. Приложение 2). Эту границу можно увидеть практически на всех радиолокационных разрезах, полученных во внутриконтинентальных районах Восточной Антарктиды (см. рис. 3.1). На этой границе хорошо заметно то, что нижележащие

слои в отдельных местах как бы «срезаются», т.е. она является границей или поверхностью несогласия, которая хорошо прослеживается на больших площадях.

Итак, теперь, отвечая на третий вопрос данного раздела, можно высказать вполне обоснованное предположение, что движение в леднике существует только у его верхней части и от нижележащего неподвижного ледника она отделена поверхностью несогласия, и можно переходить к следующему вопросу.

3.3.4. Как при движении нижние слои льда преодолевают встретившиеся на его пути препятствия?

Этот вопрос нужно в первую очередь адресовать приверженцам общепринятой гипотезы. По представлениям автора, глубинные слои ледника никак их не преодолевают, так как они неподвижны и им нет необходимости их преодолевать.

Горизонтальное движение верхнего слоя льда будет существовать с определённой скоростью до тех пор, пока на его пути не возникнет препятствие, которое нужно будет преодолеть. Под препятствиями в нашем случае необходимо понимать поднятия коренного рельефа или дневной поверхности, встречающиеся на пути потока. Здесь нужно рассматривать отдельно, как поведут себя верхняя и нижняя части ледника. При преодолении такого подъёма верхней подвижной частью ледника кинетическая энергия его движения опять может превратиться в потенциальную в соответствии с выражением 3.3, только величина её будет меньше за счёт расходов энергии на преодоление трения, противодействующего его движению. Если поднятия незначительны по высоте, то верхняя подвижная часть ледника спокойно перетекает через препятствие либо, если оно значительно, обтекает его со всех сторон, если для этого есть определённые условия. Под такими условиями следует понимать возможность для потока обогнуть препятствие, а такие условия могут существовать только на поверхности. При этом неизбежно должны наблюдаться изменения структуры льда, и вряд ли таковая будет одинакова до и после обтекания препятствия. Такие изменения должны проявляться в виде нарушений сформировавшихся структур в слоистой части ледника.

Отсутствие признаков разрушения структуры глубинных слоёв ледника на радиолокационных разрезах, полученных во внутриконтинентальных районах Восточной Антарктиды, даже если предположить, что они двигались в определённом направлении и преодолевали какие-то препятствия, служит как раз доказательством отсутствия движения, иначе эти признаки были бы заметны. На этих разрезах структура льда одинакова как с одной, так и с другой стороны, препятствий в виде поднятий коренного рельефа, которые они якобы преодолели при движении в сторону побережья.

В соответствии с этим, ответом на четвёртый вопрос раздела будет следующее предположение: при горизонтальном движении льда препятствия преодолевает только его верхняя подвижная часть.

И последнее, что необходимо рассмотреть в свете горизонтального движения ледника: почему меняется мощность ледника и что происходит с массами льда при таком движении, т.е. за счёт чего меняется его масса и чем замещаются перемещённые объёмы льда?

3.3.5. Чем замещается смещённая в определённом направлении масса льда?

Вопрос, связанный с изменениями массы льда при его смещении, нужно прежде всего адресовать приверженцам общепринятой модели строения ледника в Антарктиде, так как на радиолокационных разрезах ледник очень часто меняет свою мощность, т.е. массу. За счёт чего при выровненном рельефе дневной поверхности изменяется масса льда? Ответом на этот вопрос может стать рассмотрение радиоло-

кационных разрезов на рис. 3.1—3.3. На этих разрезах мощность ледника, а значит, и его масса, то больше в пониженных участках подлёдного рельефа, то меньше на поднятиях, причём дневная поверхность остаётся достаточно ровной. За счёт чего это происходит? При принятии предположений о неподвижности основной массы льда в горизонтальном направлении таких пояснений не требуется. Такие изменения мощности отдельных слоёв связаны с донным таянием и были рассмотрены ранее при анализе вертикального движения льда в разделе 3.2.

Давайте мы всё же встанем на точку зрения приверженцев общепринятой модели и представим, что мы (чисто теоретически) отодвинули в районе депрессии Восток всю массу льда от поверхности до основания в сторону как на рис. 3.8 или на других таких же. Что при этом произойдёт?

В случае смещения определённого количества льда нам необходимо учитывать то, что в районе депрессии Восток мощность льда около 3 600 м, а скорость его движения в юго-восточном направлении, измеренная на поверхности, равна примерно двум метрам в год [42]. Допустим, что мы отодвинули в сторону движения столб этого льда площадью только 1 м², и получится, что за год мы отодвинули 7 200 м³ льда в направлении стрелок на рис. 3.8. Не будем проверять, за счёт какой энергии мы это сделали, нами это рассмотрено ранее, и такого быть не может, но у приверженцев общепринятой гипотезы, видимо, есть своё объяснение.

Продолжим эксперимент и задумаемся, образуется ли здесь провал глубиной 3 600 м и шириной 2 м из-за отсутствия отодвинутого количества льда, или он заполнится за счёт поступления такого же количества льда из других районов или за счёт осадков? Учитываем то, что мы отодвинули только столб льда площадью 1 м² и только за один год, а площадь структуры значительно больше, и лёд отсюда уходит уже в течение значительного времени, значит, и количество перемещённого льда отсюда огромно и его трудно даже себе представить. Не будем тратить время на эти расчёты, только попробуем представить, за счёт чего может здесь компенсироваться его отсутствие в таком огромном количестве, ведь явного провала мы здесь не видим. В районе этой структуры количество выпавших осадков вряд ли будет достаточно, чтобы восполнить такую убыль, к тому же осадкам нужно какое-то время, чтобы превратиться в лёд и стать участком с хорошо выраженной слоистостью взамен ушедшего. Остаётся только рассмотреть, может ли эта убыль восполниться за счёт приноса такого же количества льда из соседних областей, причём он должен иметь такое же строение, чтобы на радиолокационном разрезе не видно было разницы.

Нужно признать, что предположение о приносе льда из соседних областей не реально или противоречит здравому смыслу. Во всём окружении этой структуры не найдётся такого количества льда, чтобы скомпенсировать его уход отсюда. За то время, пока, по их мнению, ледник движется всей своей массой, все окружающие депрессию подлёдные возвышенности каменного основания, откуда может приноситься лёд, уже обнажились бы. Учтём то, что в прибрежных областях, где средняя мощность льда достигает значений больше 1 000 м, а скорость смещения таких масс льда намного больше, то и компенсация этих масс льда должна быть намного больше. Надеемся, что приверженцы общепринятой гипотезы нам всё объяснят.

Смещение же не такого огромного количества льда, а только небольшого количества в верхней части ледника вполне объяснимо, и оно может быть скомпенсировано отчасти за счёт осадков, а отчасти за счёт вовлечения в этот процесс верхних слоёв неподвижного льда, что приведёт при этом только к смещению поверхности несогласия вниз по разрезу.

По представленным автором соображениям, здесь, да и везде в Антарктиде компенсация убывающей массы льда за счёт горизонтального движения, может соблюдаться только при условии горизонтального смещения по склону верхнего ограниченного по массе слоя льда. Такое предположение вполне соответствует здравому смыслу, является ответом на пятый вопрос раздела, и на этом можно закончить рассмотрение вопросов, связанных с горизонтальным движением льда в Антарктиде.

Но при этом, рассматривая тему перемещения верхней части ледника и вовлечения в этот процесс нижних более древних слоёв, мы затрагиваем очень важную тему, связанную, возможно, с изменением климата на планете. При наличии процесса смещения верхних слоёв ледника становится важным ответ на вопрос: какая температура льда «законсервирована» под современной поверхностью ледника? Если Антарктида является действительно «кухней погоды», то это может привести к изменению средней температуры на планете в ту или иную сторону, а значит, и повлиять на климат. Возможно, это уже начинает сказываться, учитывая те катаклизмы, которые мы наблюдаем в последнее время. К сожалению, такие данные о температуре под поверхностью ледника на сегодняшний день отсутствуют по непонятной причине (см. табл. 1.1). Необходимо этот пробел восполнить и провести такие исследования. Вопросы изменения климата на планете становятся весьма актуальными в последнее время.

Переходя к дальнейшему анализу строения ледникового покрова Антарктиды, необходимо рассмотреть, доходит ли движущийся по версии приверженцев общепринятой гипотезы ледник до побережья и что там с ним происходит. В результате такого рассмотрения можно будет заметить и проанализировать причину различия в строении ледника во внутриконтинентальных и прибрежных областях Восточной Антарктиды, которые хорошо заметны на радиолокационных разрезах, полученных в этих районах. Рассмотрим эти различия в следующей главе.

4. РАЗЛИЧИЯ В СТРОЕНИИ ЛЕДНИКА ВО ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ И В ПРИБРЕЖНЫХ ОБЛАСТЯХ АНТАРКТИДЫ

Если предположить, что ледник движется всей своей массой от внутриконтинентальных областей к побережью и там со всё увеличивающейся скоростью сползает на поверхность окружающих морей или откалывается в виде айсбергов, то это было бы заметно и на радиолокационных разрезах, полученных в прибрежных областях. Для этого вернёмся к рис. 3.2 и 3.3, которые были приведены в разделе 3.2. Здесь опять необходимо сделать общее замечание — нужно учитывать, что все радиолокационные разрезы и их интерпретация в опубликованных работах обладают одним существенным недостатком — на них не выдержаны горизонтальный и вертикальный масштабы: — горизонтальный сильно сжат по отношению к вертикальному. В одной из следующих глав это обязательно будет учтено и будет представлена модель строения ледника в районе станции Восток в реальном масштабе. На приведённых рисунках, помимо несоответствия горизонтального и вертикального масштабов, не учитывается то, что скорость распространения электромагнитных волн во льду и в воде значительно различаются (см. Приложение 2), т.е. в соответствии с этим мощность однородного слоя между слоистым льдом и каменным основанием должна быть примерно в пять раз уже.

Опять обращает на себя внимание то, что на обоих этих маршрутах на протяжении почти 1 200 км слоистые структуры в леднике практически повторяют рельеф каменного основания. Помимо этого, визуально не заметны какие-то изменения слоистой структуры льда, которые неизбежно возникли, если бы он двигался со всё увеличивающейся скоростью и преодолевал при этом препятствия в виде поднятий каменного основания. Это лишний раз подтверждает предположение о его неподвижности в основной своей массе.

Приведённые в разделе 3.2 рисунки 3.2 и 3.3 могут служить примером прослеживания изохронных поверхностей на радиолокационных разрезах от скважины на станции Восток, где по результатам анализа ледового керна был установлен возраст льда на различной глубине (см. табл. 1.2), до побережья.

Такой анализ этих радиолокационных разрезов по-своему интересен, так как он как раз и даёт представление о том, как изменяется поведение изохронных поверхностей, т.е. самого ледника, от внутри континентальных областей к побережью. Обратим внимание на следующее — в районе станции Восток установленный возраст льда, приведённый на этих разрезах, составляет от 26,0 до 158,8 тыс. лет, а в прибрежной части возраст льда уже колеблется от 26,0 до 103,2 тыс. лет, причём здесь изохронная поверхность возрастом 26,0 тыс. лет расположена на большей глубине, а в нижней части ледника уже не прослеживаются поверхности возрастом 122,2 и 158,8 тыс. лет.

Почему это происходит? Первое, на что нужно обратить внимание — почему первой хорошо прослеживаемой изохронной поверхностью является поверхность возрастом 26,0 тыс. лет? Что произошло с более «молодыми» слоями? Как показывают наблюдения, слои в леднике формируются довольно быстро. В Гренландии было замечено, что в аналогичных условиях за 48 лет сформировался слой льда мощностью 80 м, т.е. в год нарастало около 1,7 м льда [40]. Какой же слой льда мог накопиться в Антарктиде за 26 тыс. лет и где он сейчас?

Если эти слои льда накапливались на леднике, который движется всей массой, как считают приверженцы общепринятой гипотезы, то никаких разрушений этих слоёв не было бы, так как и он двигался бы с основной массой льда, и мы должны были наблюдать в настоящее время и эти молодые слои льда, которые были бы такими же слоистыми, как и нижележащие. Видимо, у них есть на этот счёт свои соображения.

По высказываемым же здесь альтернативным предположениям, весь этот «молодой» слой льда разрушен за счёт движения его приповерхностных слоёв, в которое вовлекаются и нижележащие слои, в частности, судя по приведённым данным, возрастом до 26 тыс. лет. Со временем, возможно, по мере смещения верхнего слоя движение затронет и эту изохронную поверхность.

На радиолокационных разрезах заметно, что постепенно увеличивается глубина погружения этой изохронной поверхности возрастом 26 тыс. лет относительно дневной, что можно объяснить увеличением верхнего слоя льда за счёт повышенного количества осадков по мере приближения к побережью, но чем можно объяснить пропадание двух самых древних слоёв в основании ледника?

В соответствии с высказываемыми в этой работе предположениями пропадание более древних слоёв льда в нижней части ледникового покрова можно объяснить наличием донного таяния. Ранее мы уже затрагивали этот процесс и связанное с ним пропадание древних слоёв в районе депрессии Восток (см. раздел 1.6.3).

Исходя из рассмотренных ранее теплофизических соотношений, возможно, здесь донное таяние идёт более интенсивно. Это может быть связано с тем, что по мере приближения к побережью увеличиваются среднегодовые температуры на поверхности при примерно равной мощности слоя льда во внутриконтинентальных областях и у побережья, т.е. за счёт разницы температур на поверхности и в основании. В соответствии с зависимостью, приведённой на рис. 1.4, скорость донного таяния может увеличиваться если величина теплового потока здесь больше, т.е. здесь более высокие температуры в основании. Как тем, так и другим вполне можно объяснить постепенное пропадание двух нижних изохронных поверхностей. Конечно, это тоже требует дополнительных исследований.

Фактом является то, что по данным анализа представленных радиолокационных разрезов при приближении к побережью пропало (или растаяло?) в общей сложности около 700 м льда. В предыдущих разделах уже затрагивался вопрос, куда могла деваться вода, образовавшаяся при таянии этого льда (см. раздел 2.2). Очень даже реально, что она уже покинула пределы Антарктиды и растворилась в прибрежных морях.

Общим на приведённых рисунках является и то, что слоистость в средней зоне ледника сохраняется практически до районов близких к побережью, но непосредственно у самого побережья она уже отсутствует и пропадает возможность проследить в ней изохронные поверхности. На представленном на рис. 3.3 радиолокационном разрезе в районе горизонтальной отметки 650 км прослеживание изохронных поверхностей мгновенно обрывается, что говорит о каких-то резких изменениях в леднике. Получается, что ледник не «сползает» в окружающие моря, а с ним что-то там происходит.

В связи с этим появляется необходимость рассмотреть область ледника, непосредственно примыкающую к побережью, более подробно. Это можно сделать с помощью всё тех же радиолокационных разрезов. В качестве примера рассмотрим, как выглядит структура ледника на радиолокационном разрезе, полученном в непосредственной близости от побережья (рис. 4.1). На этом разрезе хорошо заметны три

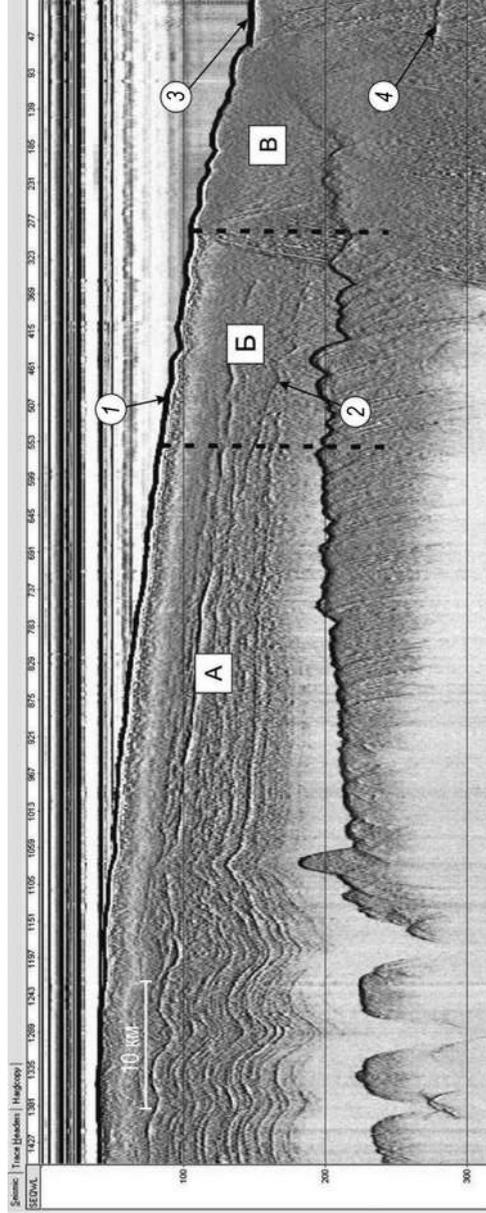


Рис. 4.1. Строение ледникового покрова вблизи побережья. Район Земли Принцессы Елизаветы и моря Содружества (материалы ФГУНПП «ЦМГРЭ»): А, Б и В — области с различным вертикальным строением ледника; 1 — отражение от дневной поверхности ледникового покрова, 2 — кратная волна от дневной поверхности, 3 — отражение от поверхности шельфового ледника, 4 — кратная волна от поверхности шельфового ледника. Вертикальными пунктирными линиями обозначены условные границы между областями.

области **А**, **Б** и **В** с различным строением ледника, которые можно отделить друг от друга условными вертикальными границами.

Область **А** имеет ту же структуру, что и во внутриконтинентальных областях. Дальше, по мере приближения к побережью, постепенно пропадает хорошо выраженная слоистость в леднике и постепенно перестаёт проследиваться однородная зона между вышележащей слоистой зоной и каменным основанием (область **Б**), т.е. это уже не тот ледник, который был ранее.

По мере дальнейшего приближения к побережью зона с хорошо выраженной слоистостью совсем перестаёт проследиваться, и лёд становится практически однородным (область **В**), т.е. это уже какой-то вообще другой лёд. Причём от зоны **Б** эта область отделяется участком, на котором на радиолокационном разрезе наблюдаются дифракции (условная вертикальная граница между областями **Б** и **В** на рис. 4.1).

Необходимо заметить, что аналогичная картина наблюдается на многих радиолокационных разрезах, полученных в прибрежных областях Восточной Антарктиды. Попробуем высказать несколько предположений, с чем могут быть связаны такие различия, но которые не будут противоречить предположениям, высказанным здесь ранее, законам физики и здравому смыслу.

На рис. 4.1 уже хорошо заметно, что синклинальные структуры не имеют горизонтального сдвига, а поверхность несогласия между верхней подвижной и неподвижной слоистой зонами постепенно погружается относительно дневной поверхности. Автор может заверить, что и на других радиолокационных разрезах, полученных в прибрежных областях, наблюдается аналогичная картина. В соответствии с высказанными ранее предположениями о том, что с увеличением угла наклона дневной поверхности в его верхней части возрастает скорость горизонтального движения льда, значит в такое движение может вовлекаться помимо сформировавшихся из осадков молодых слоёв льда всё большая масса льда из нижних слоёв.

На рис. 3.3 после отметки 600 км верхние изохронные поверхности постепенно перестают проследиваться, т.е. пропадают как раз за счёт такого разрушения при движении верхней части ледника. И опять возникают вопросы к приверженцам общепринятой модели, касающиеся строения ледника, представленного на рис. 3.3: почему, если ледник движется всей своей массой и скорость движения льда при приближении его к побережью увеличивается, т.е. за определённый период времени возрастает и масса выносимого в окружающие моря льда, мы не видим здесь заметных провалов, чем замещается масса вынесенного в окружающие моря льда? Почему, если в районе 620-го километра имеется поднятие каменного основания, которое движущемуся леднику нужно преодолеть, меняется мощность слоёв льда и не видно следов разрушения льда при преодолении этого препятствия? И ещё — почему мы не видим на побережье барьера мощностью 1 500—2000 м, т.е. льда с той мощностью, какая существует в непосредственной близости от побережья и которая, по их мнению, всей массой выносится в прибрежные моря? Надеюсь, что они на них когда-нибудь тоже ответят.

Постепенное уменьшение (выклинивание) нижней однородной зоны, т.е. слоя жидкой воды, и образование области **Б** на рис. 4.1 можно объяснить или недостаточной температурой в основании ледника для возникновения здесь донного таяния или уменьшением теплового потока при приближении к прибрежным морям. Это может происходить за счёт уменьшения мощности льда как теплоизолирующей прокладки между тёплым основанием и температурой на поверхности, т.е. здесь при такой мощности льда может не соблюдаться соотношение между тепловым потоком и разностью температур. Конечно, такое предположение требует дополнительных

исследований, примем пока его без доказательств, так как оно не противоречит законам физики, и рассмотрим возможные причины возникновения области **В**, где на радиолокационном разрезе между ней и областью **Б** появляются дифракции.

Причиной возникновения дифракций на радиолокационных разрезах является наличие каких-то неоднородностей на поверхности ледника. Обычно во внутриконтинентальных областях это находящиеся на поверхности какие-то крупногабаритные предметы или строения. Здесь же причиной их возникновения может быть наличие трещин в ледниковом покрове, которые в Восточной Антарктиде наблюдаются на некотором удалении от побережья и прослеживаются на значительные расстояния. Автор берёт на себя смелость предположить, что их образование связано как раз с наличием подвижных и неподвижных слоёв ледника, причём при движении их как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Это, конечно, тоже требует дополнительных исследований, но попробуем всё же теоретически рассмотреть вероятные условия образования зон разломов, отражающихся на радиолокационных разрезах в виде дифракций. Предположений может быть два: первое связано с горизонтальным движением льда, второе — с вертикальным.

В имеющихся публикациях можно встретить предположение некоторых исследователей о том, что в прошлом от 5 млн. до 18 тыс. лет назад ледник в Антарктиде имел большую мощность и более обширное распространение (рис. 4.2) [1, 10]. Если это так, то мы должны признать, что со временем, при наступлении потепления, краевая часть этого гигантского ледника постепенно разрушалась. В настоящее время мы наблюдаем процесс разрушения остатков этого древнего гигантского ледника.

Предположим, что граница между областями **Б** и **В** является древним «барьером», только раньше он был более высоким по сравнению с настоящим. Краевая часть этого барьера не могла долго оставаться без изменений, она неизбежно должна «осыпаться», т.е. находящиеся на его краю лёд неизбежно должен разрушаться, превращаясь либо в шельфовый, либо вывальной ледник.

При уменьшении размеров прибрежного ледника (откалывания края) образуется высокий вертикальный обрыв, по которому будут постепенно спускаться в сторону моря верхние подвижные слои льда и заполнять освободившееся перед ним пространство. При этом постепенно будет разрушаться и дневная поверхность за счёт движения верхней части ледника, но на краю барьера будет существовать излом или перегиб верхнего подвижного слоя. На месте излома в верхнем слое льда могут образовываться вертикальные трещины, и мы можем наблюдать такую картину как на рис. 4.1.

Ещё одним предположением, возможно более фантастичным, может быть то, что ледник по разные стороны от границы между областями **Б** и **В** лежит на различном основании — слева от границы на слое воды, пусть и очень тонком, а справа на каменном основании. В этом случае ледник будет вести себя по-разному – слева он может постепенно опускаться вниз при таянии, т.е. разрушении его нижнего слоя, а справа оставаться какое-то время неподвижным.

Конечно, как одно, так и другое высказывание требует дополнительных исследований, но ни первое, ни второе, на мой взгляд, не противоречат законам физики и здравому смыслу.

То, что такая структура льда наблюдается на всех радиолокационных разрезах, полученных в прибрежных областях, позволило автору построить схему прослеживания различных областей **А**, **Б** и **В** вдоль побережья (рис. 4.3).

Высказанные в этой работе предположения, частично подтверждаемые представленными здесь данными, полученными в ходе радиолокационных исследова-

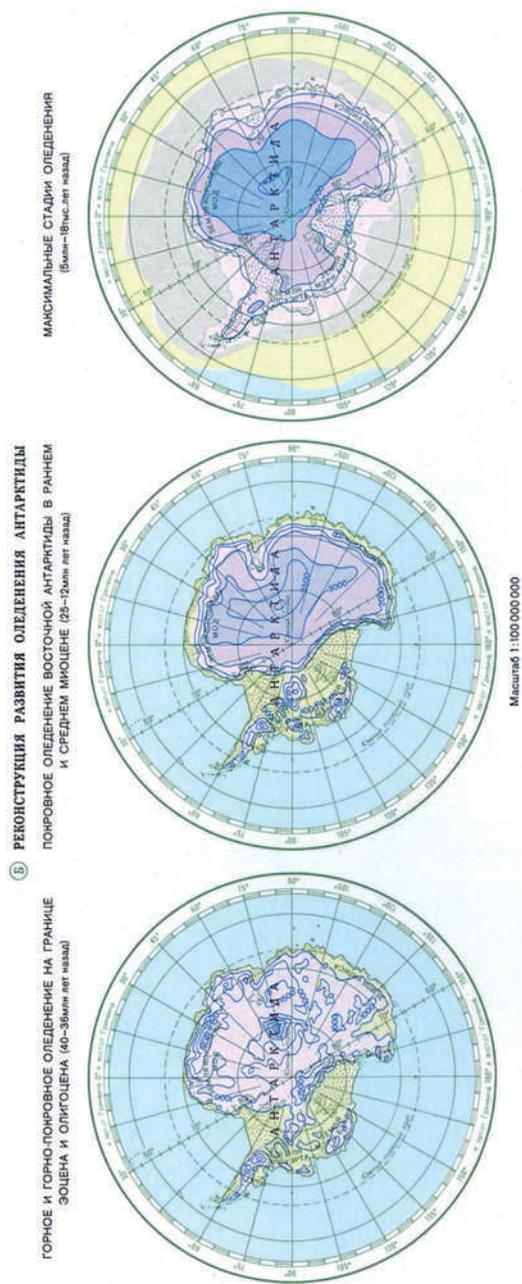


Рис. 4.2. Некоторые этапы развития ледникового покрова Антарктиды [1]

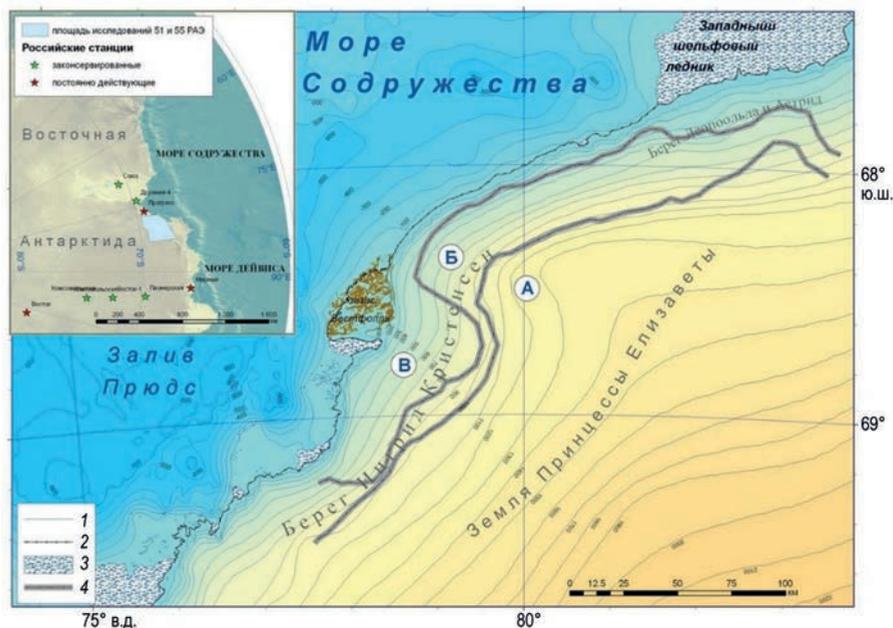


Рис. 4.3. Плановое расположение прибрежных областей, различающихся строением ледникового покрова по данным радиолокационных исследований 51 и 55 РАЭ (по материалам ФГУНПП «ПМГРЭ»): 1 — изолинии глубин моря и высот дневной поверхности, 2 — береговая линия, 3 — шельфовые и выводные ледники, 4 — границы областей А, Б и В, различающихся по строению ледникового покрова.

ний, позволяют автору взять на себя смелость составить модель строения ледникового покрова Восточной Антарктиды и происходящих в нём процессов в областях, непосредственно примыкающих к побережью (рис. 4.4).

На этой модели представлены основные различия в строении ледника, условные границы между различными зонами и областями и основные процессы, происходящие в нём. Основными особенностями этой модели, в отличие от общепринятой, являются наличие неподвижной и подвижной частей ледника, наличие под ледником слоя жидкой воды, которая под действием давления на неё сверху массы льда стекает в океан. Помимо этого, на модели показаны осадочные породы, наличие и условия образования которых будет рассмотрено в следующей главе на примере возможного геологического строения депрессии Восток.

Данная модель, показанная на рис. 4.4, построена на основе высказанных в этой работе предположений, главными из которых, на мой взгляд являются, донное таяние, сток талой воды в окружающие моря и наличие вертикального и горизонтального движения льда. Конечно, правильность (или ошибочность) такой модели требует проведения дополнительных исследований, но, надеюсь, когда-нибудь они будут проведены.

Рассматривая структуру льда в глобальных масштабах от внутриконтинентальных областей к побережью, мы затрагиваем опять очень важный вопрос, связанный с климатом — ледник разрушается снизу за счёт таяния, сверху — за счёт горизонтального смещения и вовлечения в этот процесс нижних более древних слоёв льда и сбоку у побережья, где этот лёд становится либо шельфовым, либо, откалываясь от основной массы, уходит в океан в виде айсбергов.

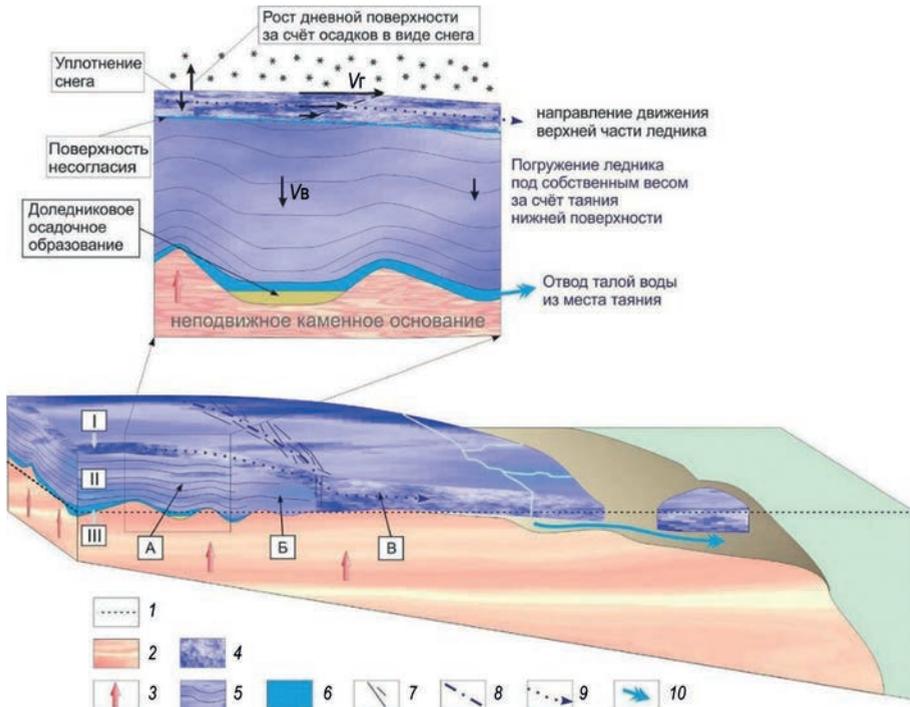


Рис. 4.4. Модель строения ледникового покрова Антарктиды в областях, непосредственно примыкающих к побережью и процессы, происходящие в нём: I, II и III — зоны в ледниковом покрове, А, Б и В — области с различным вертикальным строением ледника, V_r — скорость горизонтального движения льда, наблюдаемое на поверхности, V_b — скорость погружения льда за счёт таяния нижнего слоя и отвода воды из места таяния. Цифрами обозначены: 1 — уровень моря, 2 — каменное основание, 3 — геотермальный тепловой поток, 4 — верхняя зона (зона I) ледникового покрова, прибрежный ледник, выводные и шельфовые ледники, айсберги, 5 — средняя (главная) зона (зона II) ледникового покрова, 6 — нижняя однородная зона (зона III) ледникового покрова (жидкая талая вода), 7 — трещины в поверхностных и внутренних частях ледника, 8 — граница начала области развития трещин, 9 — направление движения верхней части ледникового покрова, 10 — сток талой воды из-под ледника в океан.

Как долго уже длится этот процесс? Как долго он ещё может продолжаться? С какой скоростью идёт тот или иной из перечисленных процессов? На все эти вопросы необходимо искать ответы, и для этого необходимо проводить дополнительные исследования, которые по своей значимости, вероятно, важнее, чем проникновение в подледниковую воду «озера Восток», которое таковым может и не быть.

В подледниковую воду можно проникнуть и у побережья, что значительно проще. Наличие жидкой воды за пределами «озера Восток» может полностью перевернуть наши представления об Антарктиде. В связи с этим в следующей главе будет рассмотрено возможное строение геологической структуры в районе станции Восток, т.е. она может и не быть «озером Восток», а быть чем-то другим.

И ещё один очень важный вопрос: почему на рис. 4.1 в области В, где радиолокационный маршрут проходит над Западным шельфовым ледником, отсутствует резкая контрастная граница между льдом и водой? Почему она существует только

в подледниковых «озёрах»? Ведь здесь такие же условия — вода, покрытая сверху слоем льда. У льда и у воды такие же, как и там, диэлектрические проницаемости, а границы нет. Нет её и в других районах с аналогичными условиями, которых на Земле огромное множество. Возможно, это связано с наличием ажурного слоя? Это будет очередным вопросом, адресуемым приверженцам общепринятой гипотезы, ждём ответов на него.

На примере модели строения ледникового покрова Антарктиды, представленной на рис. 4.4, можно дать ещё несколько ответов на вопросы, которые возникали в процессе рассмотрения механических процессов, происходящих в леднике и тех различий в строении ледника, которые мы наблюдаем на радиолокационных разрезах:

1. Основная масса льда не доходит до побережья из-за отсутствия горизонтального движения основной массы ледника.
2. До побережья доходит только верхняя подвижная часть ледника.
3. Строение ледника в прибрежных областях резко отличается от его строения во внутриконтинентальных областях Антарктиды.
4. В прибрежных областях в леднике можно выделить три области различного строения ледника, которые можно отделить условными вертикальными границами.
5. Вблизи побережья существует зона вертикальных разломов, которая прослеживается на значительные расстояния.
6. Имеющиеся данные позволяют построить модель строения ледникового покрова Восточной Антарктиды, отличающуюся от общепринятой.
7. Эта модель предусматривает наличие донного таяния, вертикальное движение льда, горизонтальное движение только верхней части ледника, наличие талой воды и сток её в окружающие моря.

Далее рассмотрим, чем же на самом деле может быть геологическая структура, расположенная в районе российской станции Восток в Восточной Антарктиде?

5. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СТРУКТУРЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК В ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЕ

В главе 2 при рассмотрении взаимодействия льда и жидкой воды было выяснено, что в природе не может существовать такой геологической структуры, как подледниковое «озеро Восток», причём с водным слоем таких огромных размеров. Возможно, приверженцы данной гипотезы и приведут какие-то свои доводы в пользу его существования. Не будем углубляться в тему общепринятой гипотезы, в приложении 1 собраны все сведения из открытых источников об истории открытия и изучения этой структуры как подледникового озера.

В свою очередь зададим себе несколько вопросов и, найдя ответы на них, возможно, определим, чем на самом деле может быть эта уникальная подлёдная геологическая структура.

1. Может ли эта структура быть осадочным образованием, сформировавшимся до начала оледенения?

2. Подтверждается ли такое предположение имеющимися геофизическими данными?

3. Какова может быть альтернативная модель строения геологической структуры в Восточной Антарктиде в районе станции Восток?

И опять, в очередной раз будем искать ответы на эти вопросы.

5.1. МОЖЕТ ЛИ ЭТА СТРУКТУРА БЫТЬ ОСАДОЧНЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ, СФОРМИРОВАВШИМСЯ ДО НАЧАЛА ОЛЕДЕНЕНИЯ?

На сегодняшний день единственным доводом в пользу существования подледникового озера является проникновение в слой жидкой воды в скважине на станции Восток, но это является лишь доказательством наличия жидкой воды под ледником, но никак не доказывает, что эта вода находится в замкнутом пространстве и имеет заявленную ими мощность около 1 000 м. В связи с этим становится важным вопрос, чем на самом деле может быть подлёдная геологическая структура, над которой на леднике расположена российская станция Восток?

В Приложении 1 приведены робкие высказывания о том, может ли эта структура быть осадочным бассейном, и, судя по ним, это вполне вероятно и следует рассмотреть такую возможность более подробно.

Чтобы начать отвечать на данный вопрос — может ли структура в районе станции Восток быть осадочным бассейном, необходимо в дополнение к сведениям, приведённым в приложении 1, ещё раз вернуться к истории развития материка под названием Антарктида. Опубликованные в настоящее время данные, которые приводятся здесь напрямую из Интернета (выделены курсивом) и которым можно верить (или не верить?), являются опять же только предположениями:

«Возраст пород кристаллического фундамента составляет 2,5—2,8 млрд лет, самые древние породы Земли Эндерби — более 3 млрд лет. Фундамент покрыт более молодым осадочным чехлом, сформировавшимся 350—190 млн лет назад, в основном морского происхождения».

Про оледенение Антарктиды, можно найти следующие сведения: *«Обледенение Антарктиды началось во время среднего эоцена около 45,5 миллионов лет назад и распространилось во время эоцен-олигоценового вымирания около 34 миллионов лет назад».*

Исходя из приведённых сведений об осадках морского происхождения, естественно возникает вопрос: а что с осадками другого происхождения? Ведь на этом материке за время геологического развития до оледенения, а это ни много, ни мало практически те же 2,5 млрд. лет, как и на других материках, шли геологические процессы, связанные с эрозией, т.е. происходило разрушение, перемещение, отложение и накопление геологических пород, другими словами, должны были образовываться большие или маленькие осадочные бассейны. Почему-то на других материках это произошло, а в Антарктиде нет. Об этом, пусть и робко, говорят даже приверженцы общепринятой гипотезы (см. Приложение 1), но, тем не менее, до сих пор здесь не обнаружено ни одного такого осадочного бассейна, никто об их наличии в Антарктиде не говорит, и никто их не ищет. Мне кажется это несправедливым, ведь они должны быть и в Антарктиде, и не важно, что они находятся под мощным слоем льда. Как и на других материках, они должны обладать какими-то характерными признаками, по которым их можно определить. Про такую геологическую структуру, как осадочный бассейн, известно следующее:

«Осадочный бассейн — это область консолидированной земной коры, перекрытая мощной толщей недеформированных осадков. Для образования осадочного бассейна необходимы два главных условия: пространство для осаждения осадков и источник осадочного вещества».

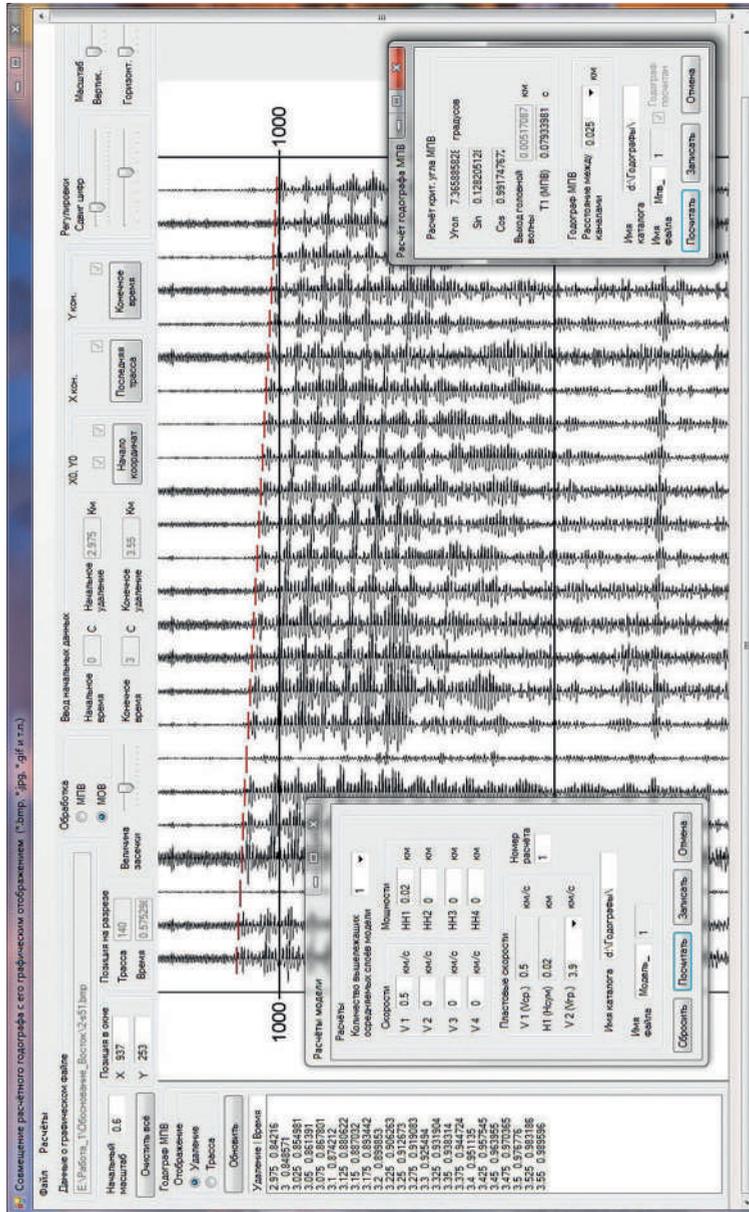
Думаю, что в Восточной Антарктиде, в районе, где сейчас расположена станция Восток, для этого раньше были такие условия. Поэтому естественным ответом на первый вопрос данного раздела будет следующий вывод: наличие осадочных образований в виде бассейнов с накопленными в них за время существования материка осадками различного генезиса вполне вероятно, и необходимы их поиск и исследования.

Попробуем найти доказательства предположения о том, что геологическая структура, принимаемая в настоящее время за подледниковое озеро, является погребённым под ледником древним осадочным бассейном. Для этого нужно будет использовать имеющиеся в нашем распоряжении данные как радиолокационных, так и сейсмических исследований — как более глубинных, так и тех, которые не только дают представление о слое льда, но могут многое сказать и о породах, расположенных под ледником. В приложениях 2 и 3 приводятся сведения о возможном составе и физических свойствах геологических пород, которыми может быть сложена эта структура (см. таблицы Приложений 2 и 3). Попробуем найти признаки присутствия этих геологических пород в этом районе Антарктиды начиная с самого верха возможной геолого-геофизической модели. Для этого проанализируем имеющиеся в нашем распоряжении данные радиолокационных и сейсмических исследований, полученные в этом районе Восточной Антарктиды.

5.2. АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЙОНЕ ДЕПРЕССИИ ВОСТОК

Благодаря интересу к «озеру Восток», данных радиолокационных и сейсмических исследований, полученных в рассматриваемом районе Восточной Антарктиды, вполне достаточно для такого анализа. На рис. 5.1 показаны радиолокационный временной разрез и положение точек сейсмических зондирований методом отражённых волн (МОВ) на этом же профиле с элементами интерпретации сторонников общепринятой гипотезы.

Забудем пока о такой интерпретации и будем искать признаки наличия здесь осадков путём построения геолого-геофизической модели с использованием при-



Определение границы между льдом и водой на сейсмических данных МОВ затруднительно ввиду её специфической формы (см. раздел 1.6.4) и незначительной мощности слоя воды для сейсмических исследований, но низкоскоростной слой воды с его хоть и маленькой мощностью, тем не менее учитывался при моделировании (слой с пластовой скоростью 1 500 м/с на моделях). Далее с целью доказательства наличия такого слоя будут приведены результаты специального моделирования, при котором учитывалась частично-кратная волна при неоднократном прохождении сейсмических волн через этот слой.

Следующей задачей моделирования является определение наличия волны от предполагаемого слоя осадков (границы льда и воды у приверженцев общепринятой модели). При расчёте годографа отражённой волны от подошвы водного слоя (кровли слоя осадков) учитывается уже совместная мощность слоёв льда и воды.

На рис. 5.3 приведён расчёт годографа отражённой волны по сейсмограмме 2s51 от границы каменного основания при условии, что оно представлено осадками. При этом в модели под слоем льда мощностью 3 600 м присутствует слой воды 180 м. Глубина залегания каменного основания при этом равна 3 800 м.

В этой же точке по результатам анализа радиолокационных данных получены следующие значения: подошва льда — 3 657,7 м, мощность слоя воды (однородного слоя) — 142,3 м, при глубине залегания каменного основания (контрастной границы) 3 800 м. В соответствии с этими данными сейсмическая и радиолокационная модели достаточно хорошо совпадают.

Корреляция радиолокационных временных разрезов производилась при условии, что на них однородный слой — это слой воды со скоростью распространения электромагнитных волн в нём 33 м/мкс, а контрастная граница — граница между водой и осадками.

Состав осадков в данной точке установить затруднительно, так как здесь второе отражение достаточно слабое, и от каких пород оно сформировалось, сказать трудно. Однако моделирование со скоростью распространения сейсмических волн в слое возможных неконсолидированных осадков 1 750 м/с подтверждает их наличие в этом месте. Мощность их может составлять около 200 м (рис. 5.4). Глубина залегания границы между осадками и коренными породами относительно поверхности ледника составляет 4 000 м.

Проверим наличие слоя осадков в другой точке зондирования. Анализ сейсмограммы 7s51 на отражённую волну от поверхности каменного основания, представленного осадками, показан на рис. 5.5. Здесь в расчётной модели присутствуют следующие слои: снежно-фирновый — 20 м, льда — 3 860 м, воды — 35 м. Глубина залегания границы воды и осадков — 3 915 м.

По радиолокационным данным в этой точке получены следующие значения: подошва льда расположена на глубине 3 594,6 м от поверхности, под ним находится слой воды мощностью 30,8 м, глубина залегания каменного основания, представленного осадками, — 3 915 м от поверхности. Расхождения для положения подошвы ледника и мощности слоя воды могут быть связаны с трудностью определения границы между льдом и водой на радиолокационных разрезах. Тем не менее по результатам моделирования слой воды здесь значительно меньше, что заметно и на радиолокационном разрезе.

Для сейсмического зондирования 7s51 при той же скорости распространения сейсмических волн в осадках 1 750 м/с мощность слоя неконсолидированных осадков составляет 300 м, что больше, чем в точке зондирования 2s51 (рис. 5.6).

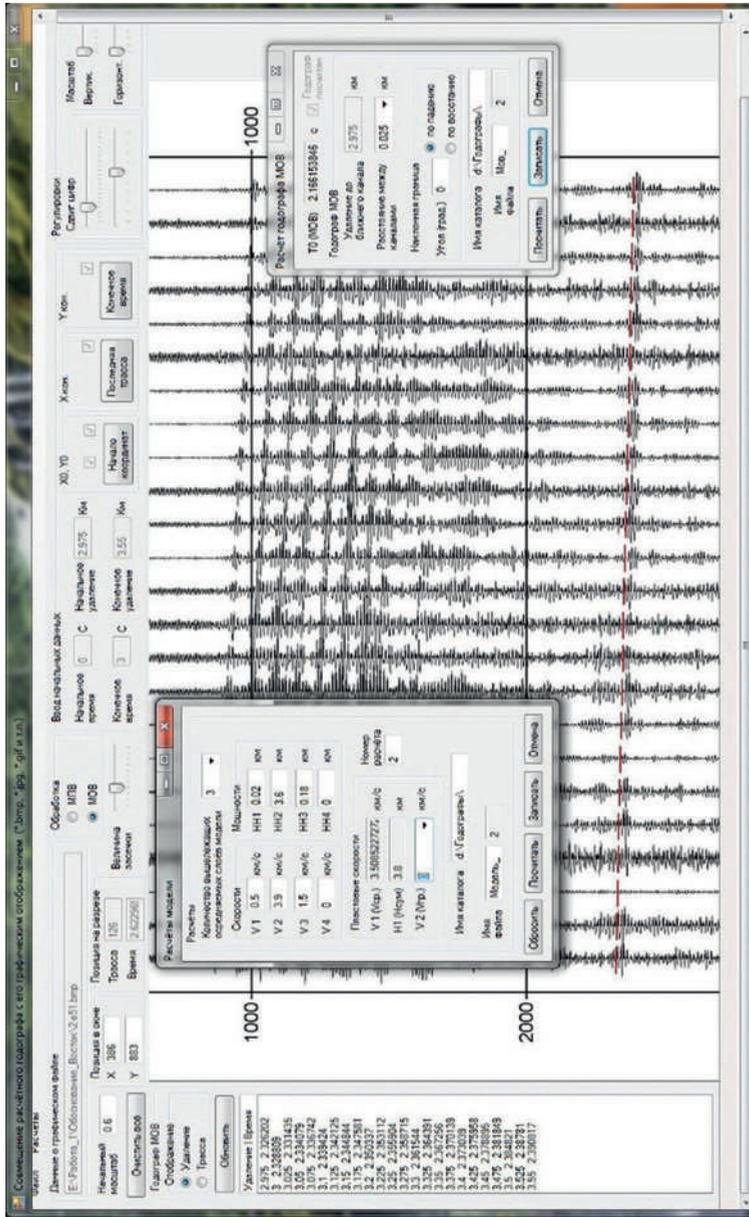


Рис. 5.3. Модель и теоретический годограф отражённой волны от кровли слоя осадков под слоем льда и воды (сейсмограмма 2s51)

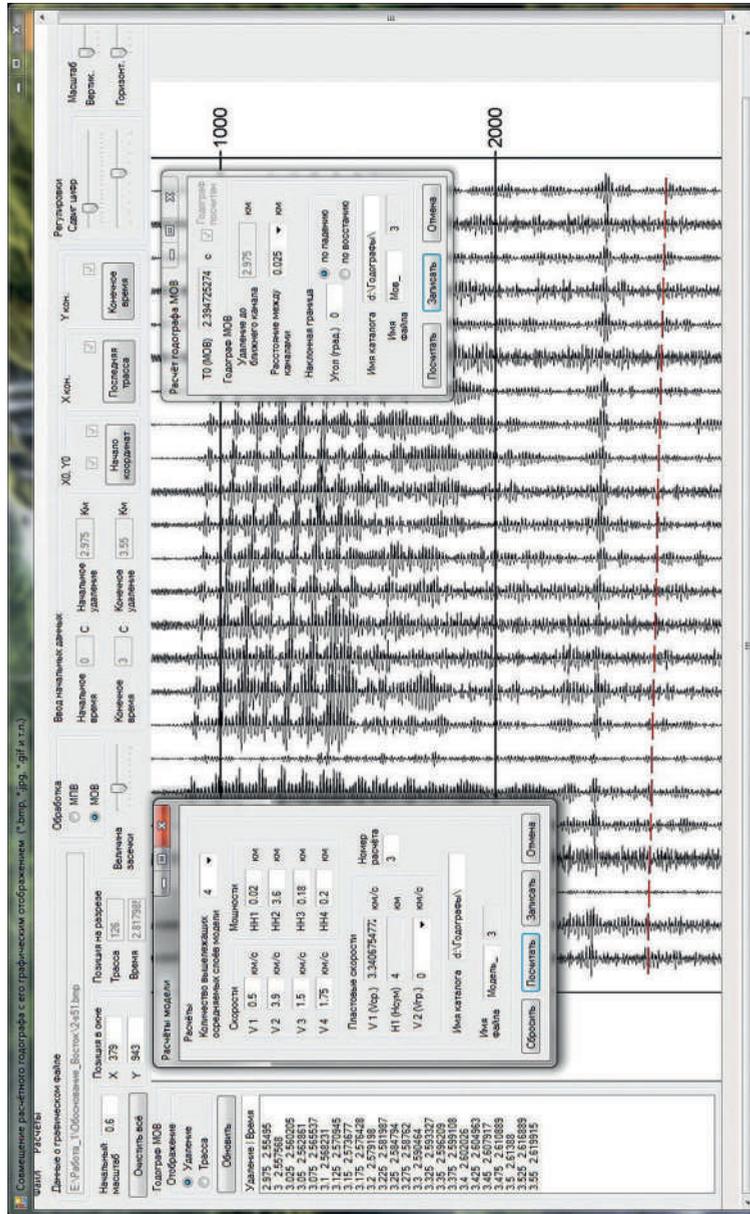


Рис. 5.4. Модель и теоретический годограф отражённой волны от коренных пород под слоями льда, воды и осадков (сейсмограмма 2s51)

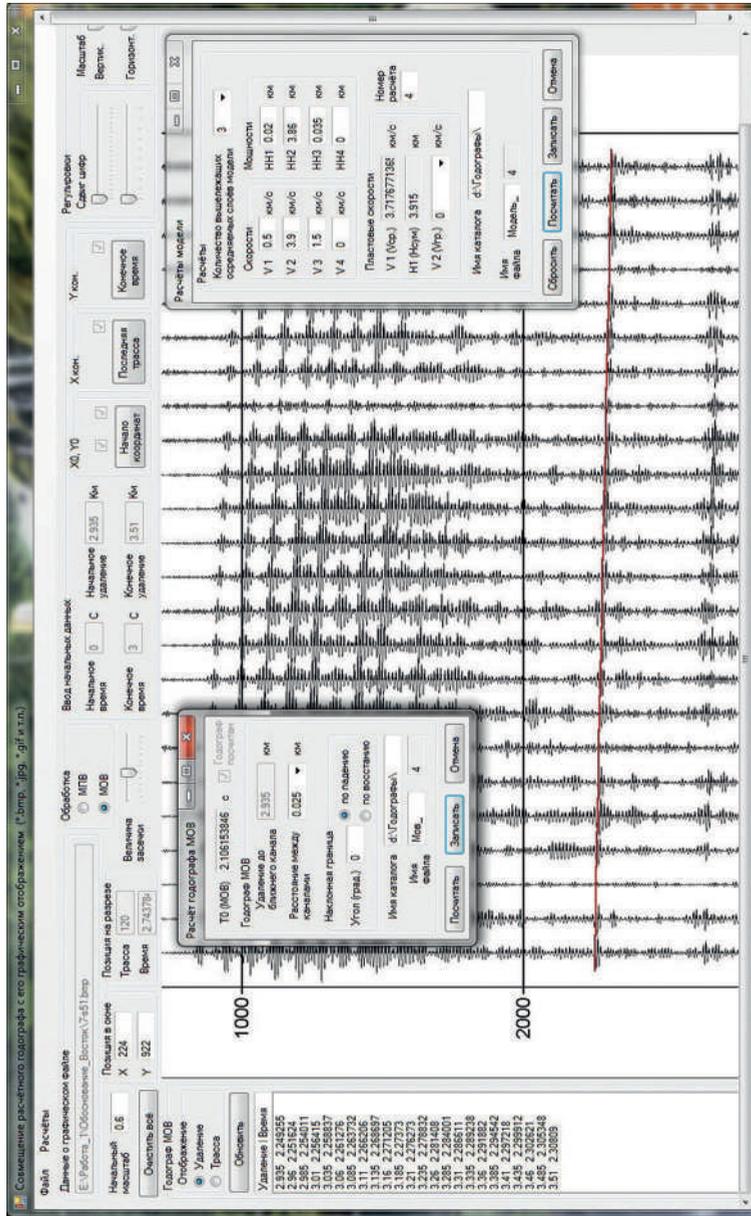


Рис. 5.5. Модель и теоретический годограф отражённой волны от слоя осадков под слоем льда и воды (сейсмограмма 7s51)

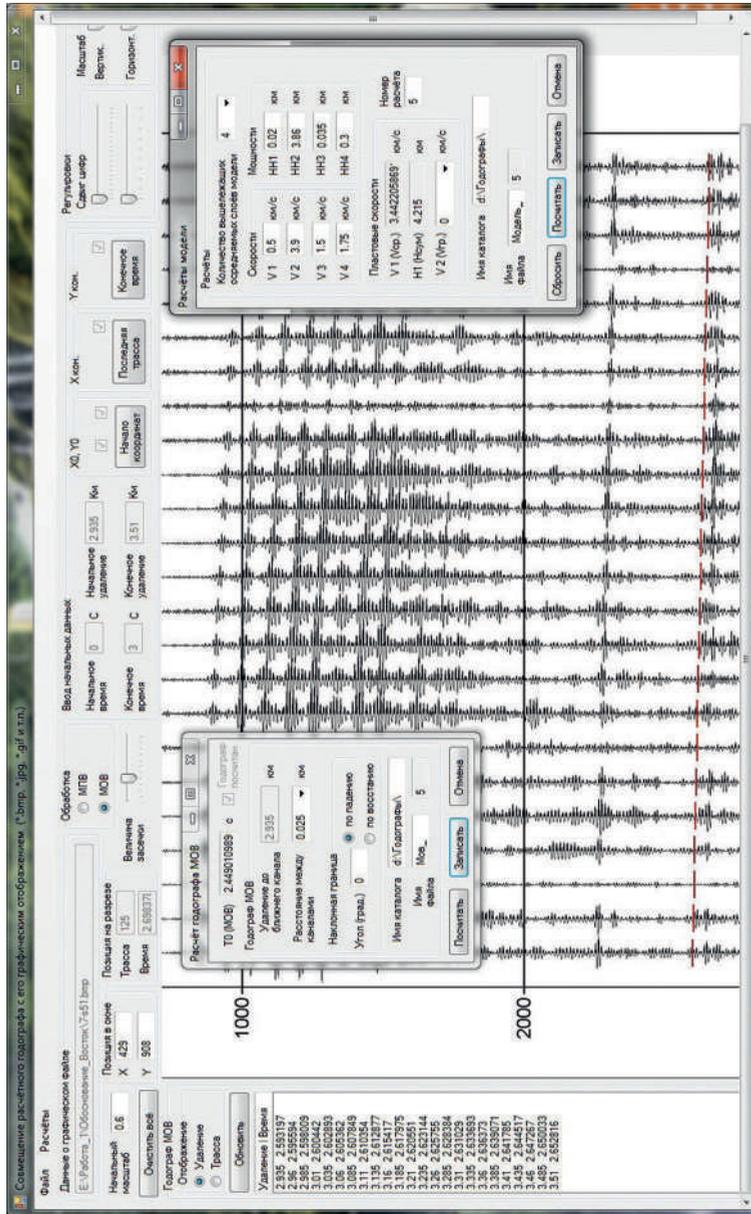


Рис. 5.6. Модель и теоретический годограф отражённой волны от подошвы слоя осадков (сейсмограмма 7s51)

Определить наличие и мощность слоя неконсолидированных осадков можно и по другим сейсмическим данным, полученным в других районах. На рис. 5.7 приведено моделирование по монтажу сейсмограмм, полученных в 44-й РАЭ в непосредственной близости от станции Восток.

По результатам моделирования здесь следующее расположение слоёв: снежно-фирновый — 15 м, ледник — 3 600 м, Слой воды — 65 м, осадки со скоростью распространения сейсмических волн 1 700 м/с — 720 м. В связи с тем, что в данном районе имеется только одна хорошо выраженная отражённая волна, это может говорить об отсутствии здесь консолидированных осадков. Проверим их наличие при удалении от станции Восток на север.

Для определения наличия консолидированных осадков воспользуемся моделированием с применением более глубинного метода преломлённых волн (МПВ). Эти зондирования делались на значительном удалении от станции Восток в северном направлении.

Пример наличия границы от консолидированных осадков, по данным годографа преломлённых волн, приведён на рис. 5.8. В связи с тем, что алгоритм программы моделирования предусматривает только четыре слоя модели, два верхних слоя фирна и льда были объединены в один со скоростью распространения сейсмических волн в нём 3 762 м/с.

По результатам моделирования получают следующие мощности слоёв: снежно-фирновый 3 720 м, слой воды — 65 м, неконсолидированные осадки со скоростью распространения сейсмических волн в нём 1 700 м/с — 800 м, слой консолидированных осадков со скоростью распространения сейсмических волн в нём 4 500 м/с — 1 700 м. Общая мощность осадков в этом случае составляет 2 500 м, что ближе к прогнозируемому для осадочных бассейнов. При моделировании преломлённой волны на границе осадков и коренных пород учитывалась пластовая скорость распространения сейсмических волн в них 6 000 м/с.

На рис. 5.9 представлена модель, построенная по данным МПВ 59-й РАЭ, на которой присутствуют слой воды мощностью 100 м, слой неконсолидированных осадков мощностью 800 м, а преломлённая волна сформировалась на кровле консолидированных осадков со скоростью распространения сейсмических волн в них 4 300 м/с.

При моделировании данных МПВ, помимо определения наличия осадков, можно проверить и величину слоя воды в случае двойного прохождения волны через него и нижележащий слой осадков при удвоении их мощности в модели, т.е. частично-кратной отражённо-преломлённой волны. На рис. 5.10 показано формирование преломлённой волны при тех же условиях, что и на рис. 5.9, но при увеличенной в два раза мощности слоёв воды и неконсолидированных осадков (суммарная мощность 1 800 м), что равносильно двойному пробегу сейсмической волны в них. Причём ниже можно заметить даже фрагменты волны, сформированной в результате ещё одного такого пробега.

Представленные результаты моделирования могут быть доказательством как наличия тонкого относительно мощности ледника слоя жидкой воды под ним, так и наличия осадков различного состава.

Высказанные здесь предположения могут быть ответом на второй вопрос раздела: альтернативный анализ сейсмических и радиолокационных данных подтверждает наличие в депрессии Восток маломощного относительно мощности ледника слоя жидкой воды мощностью от 35 до 142 м, а также наличие неконсолидированных осадков мощностью от 200 до 800 м и консолидированных осадков мощностью около 1 700 м.

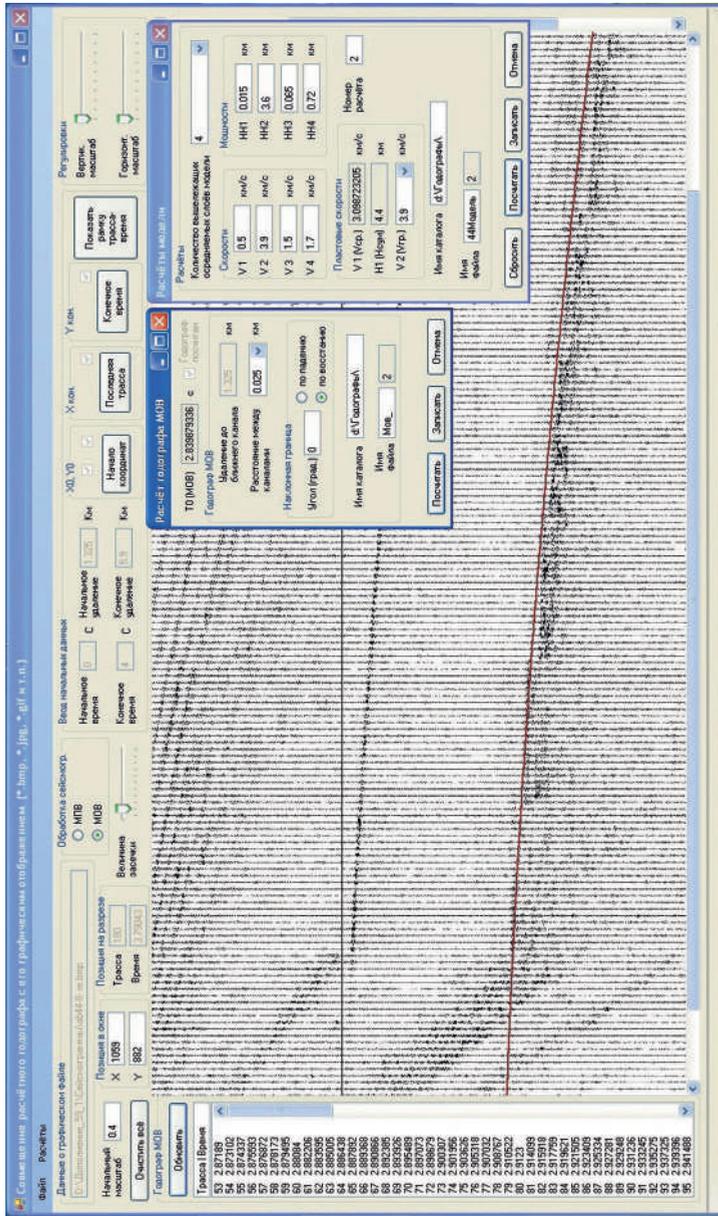


Рис. 5.7. Модель и теоретический голограф отражённой волны от подошвы слоя осадков (монтаж сейсмограмм MOV 44 РАЭ)

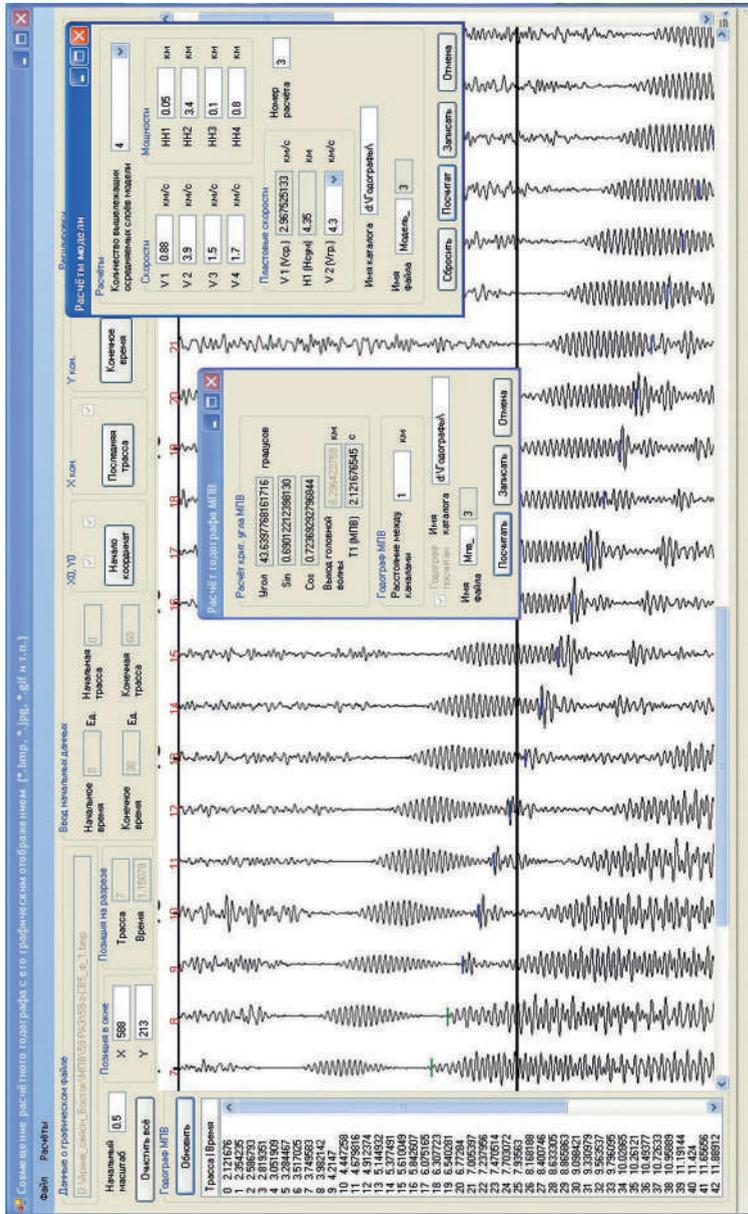


Рис. 5.9. Годограф преломлённой волны, сформировавшейся на поверхности слоя консолидированных осадков с пластовой скоростью 4,3 км/с

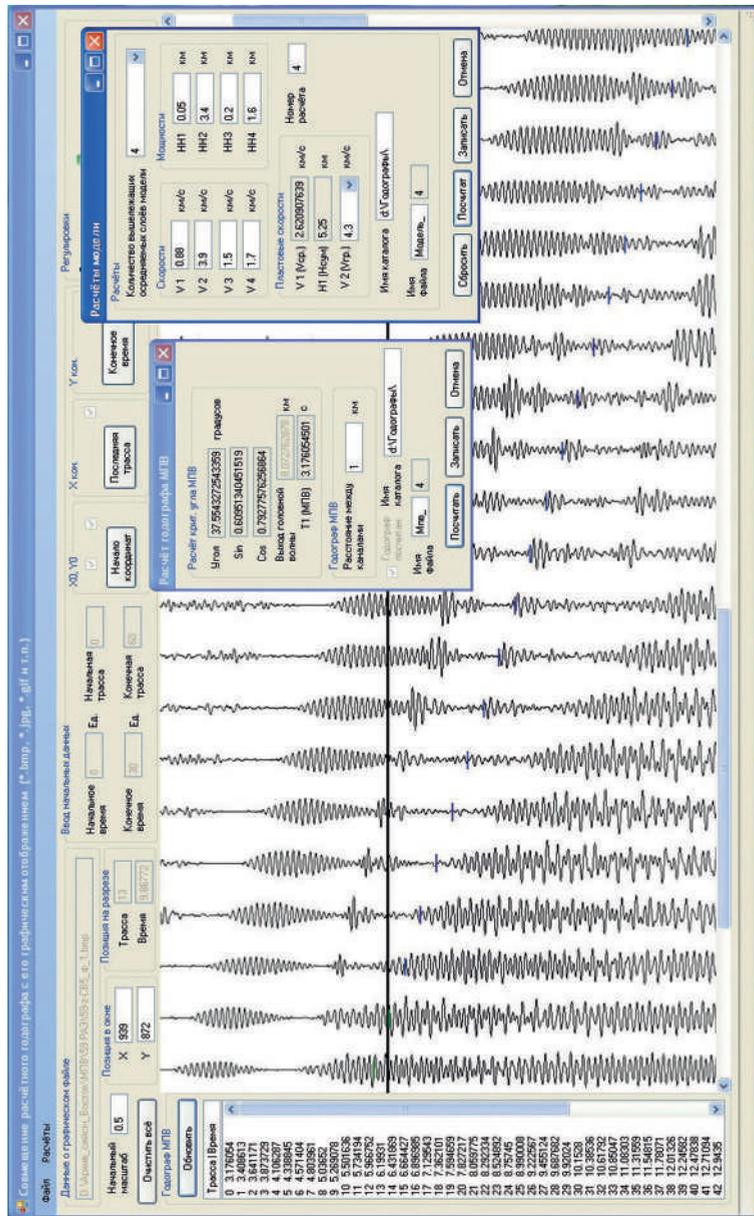


Рис. 5.10. Повторное наблюдение преломлённой волны, прошедшей кратное отражение в слое воды

Конечно, требуются дополнительные исследования и тщательный анализ всех имеющихся в нашем распоряжении данных, но уже на этом этапе такая интерпретация позволяет построить модель строения геологической структуры, расположенной в районе станции Восток в Восточной Антарктиде, отличную от общепринятой.

5.3. АЛЬТЕРНАТИВНАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ПОДЛЕДНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК

Полученные результаты анализа радиолокационных и сейсмических данных позволяют достаточно уверенно предположить, что геологическая структура в районе станции Восток представляет собой депрессию коренного ложа, заполненную осадками различного генезиса. В этом случае здесь отсутствует подледниковое озеро, а предположение, что присутствующая здесь под ледником жидкая вода расположена в виде относительно тонкого слоя между льдом и осадками, получает дополнительное подтверждение.

Для построения альтернативной авторской модели воспользуемся общепринятыми представлениями о строении подледной геологической структуры в районе станции Восток, которая приведена в публикации Г.Л. Лейченкова [27] (см. рис. П.1.1), заменив в ней воду на неконсолидированные осадки, а слой жидкой воды расположив между льдом и каменным основанием. При этом жидкая вода будет присутствовать и за пределами депрессии отчасти за счёт таяния льда, а также за счёт того, что она под давлением вышележащих слоёв льда выдавливается за её пределы (см. главы 1 и 2).

Изменения в модели должны неизбежно коснуться и движения ледника в этом районе. В основной массе льда горизонтального движения не может быть, оно имеется только в верхних слоях и постепенно затухает с глубиной (см. главу 3). Модель должна обязательно предусматривать наличие геотермального тепла и таяние нижней поверхности ледника. Такая обобщённая альтернативная модель изображена на рис. 5.11.

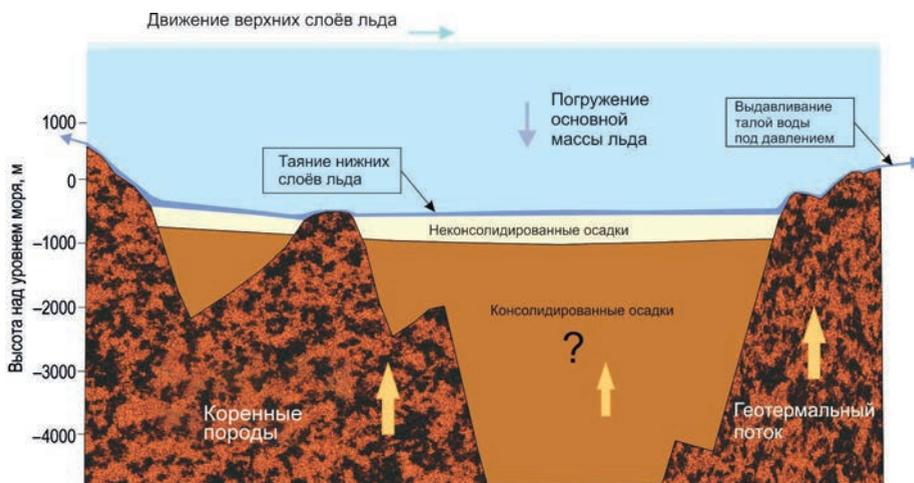


Рис. 5.11. Альтернативная модель строения геологической структуры, расположенной в районе станции Восток, и физические процессы, которые здесь происходят. Горизонтальный масштаб не соответствует вертикальному (сильно сжат)

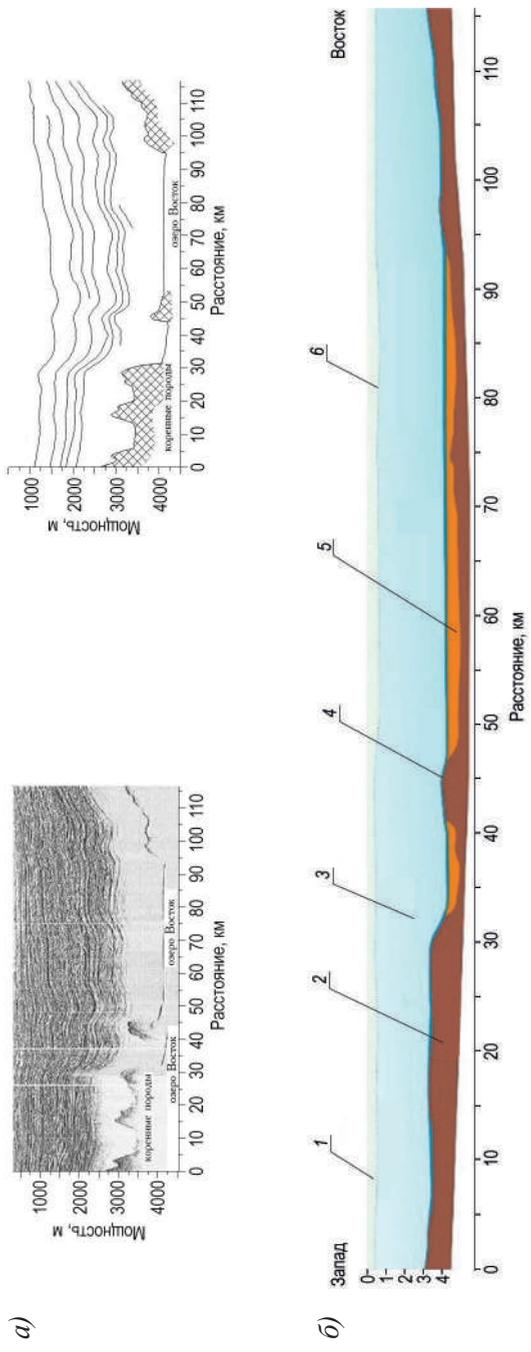


Рис. 5.12. Радиолокационный разрез через структуру в районе станции Восток (а) и альтернативная модель её строения с выдержанным масштабом по горизонтали и вертикали (б): 1 — снежно-фирновый и подвижный верхний слой ледника, 2 — кристаллический фундамент, 3 — материковый лёд, 4 — водный слой, 5 — погребённый осадочный бассейн, покрытый сверху слоем пелитов, 6 — граница между верхним снежно-фирновым, подвижным слоем и неподвижным ледником (поверхность скольжения).
 На рис. б на оси ординат — удаление от начала радиолокационного профиля (км).

Ранее уже говорилось о том, что на радиолокационных разрезах сильно искажён горизонтальный масштаб, поэтому определённый интерес представляет рассмотрение такой модели с масштабами, выдержанными по горизонтали и вертикали.

Попробуем построить какой-нибудь радиолокационный маршрут в выдержанном масштабе по горизонтали и вертикали. Ранее на рис. 5.1 приводился фрагмент радиолокационного маршрута с запада на восток через короткую ось «озера Восток». На рис. 5.12 вверху он показан целиком, а внизу приведён этот же маршрут, но с выдержанными горизонтальным и вертикальным масштабами. Заметно, что реальная модель строения структуры выглядит иначе, чем на геофизических разрезах.

Конечно, такая альтернативная модель, возможно, требует уточнений и дополнений, но она отражает все процессы, происходящие в леднике и рассмотренные в данной работе, и может служить ответом на третий вопрос указанного раздела.

Построение данной модели является завершением рассмотрения альтернативной точки зрения на имеющиеся в нашем распоряжении данные по ледниковому покрову Восточной Антарктиды вообще и района депрессии Восток в частности. Возможно, открытие «озера Восток» требует дополнительных доказательств его существования в виде геологического образования действительно в виде подледникового озера. Существование таких образований на поверхности Земли для нас понятны, но что такое «подледниковое озеро», мы до сих пор не представляем, так как их пока никто не видел. Для подтверждения их существования, а также того, о чём говорилось в этой работе, потребуется постановка дополнительных исследований, необходимость проведения которых, их цели и задачи будут рассмотрены в следующей главе, которая выступает уже в качестве заключения.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ (ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ)

В данной работе были поставлены под сомнение интерпретации имеющихся сведений о современном строении ледникового покрова Антарктиды, которые высказываются приверженцами общепринятой гипотезы и которые при внимательном рассмотрении вызывают массу вопросов. Эти вопросы были рассмотрены в совокупности, в их взаимосвязи и на их соответствие законам физики. Результатом такого рассмотрения явилась совершенно иная модель строения ледника и процессов, в них происходящих, практически полностью противоречащая общепринятой. К разочарованию некоторых исследователей, она не предусматривает существования «озера Восток» и горизонтального движения льда всей своей массой. Если приверженцы его существования будут отстаивать свою модель, то они должны предоставить свои доказательства, которые не должны при этом противоречить основным законам физики, или, в противном случае, необходимо будет признать, что Антарктида является уникальным материком, где эти законы не работают, или здесь существуют обычные для планеты Земля геологические породы, но они имеют уникальные физические свойства. В том и другом случае это было бы важным научным открытием.

В заключение можно ответить ещё на несколько вопросов, связанных с рассмотренными здесь темами.

1. Почему резкая и контрастная граница между льдом и водой наблюдается только в «озере Восток», хотя на планете достаточно мест, где имеется вода, сверху покрытая слоем льда?

2. Где в Антарктиде следует искать более древний лёд для его всестороннего изучения?

3. Как процессы, происходящие в леднике Антарктиды, могут влиять на изменение климата на планете?

4. Имеет ли наличие жидкой воды под ледником какое-то практическое значение?

Ответами на них будет следующее:

1. Резкая и контрастная граница на радиолокационных разрезах не может быть границей между льдом и водой. Нет данных, что она наблюдается в тех местах, где имеется вода, сверху покрытая слоем льда. Причиной этого является тот факт, что такая граница — это граница между водой и каменным основанием, представленным осадками с достаточно ровной поверхностью, по всей вероятности покрытая пелитами вытаявшими из нижней поверхности ледника при его таянии.

2. Древний лёд в Антарктиде следует искать над поднятиями каменного основания, где он подвергся наименьшим разрушениям.

3. Все протекающие процессы, происходящие в леднике Антарктиды, так или иначе могут влиять на изменение климата на планете. Это является темой очень тщательного изучения.

4. Жидкую воду из-под ледника легче добыть и транспортировать в те районы, где имеется её недостаток. Это тоже является темой дальнейших исследований.

Возможно, какие-то из высказанных в данной работе предположений могут показаться на первый взгляд фантастическими, но они основаны на законах физики и здравого смысла, и каждое следующее последовательно основывается на предыдущем, и они, конечно, требуют подтверждения на основе выполнения дополнительных работ. Эти работы должны подтвердить (или опровергнуть?) каждое из высказанных здесь предположений. Перечислим эти задачи.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА УТОЧНЕНИЕ СТРОЕНИЯ ЛЕДНИКА АНТАРКТИДЫ И ПОДЛЁДНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ

Предложенная автором альтернативная модель не является истиной в последней инстанции и, возможно, требует дополнительных доказательств её правильности (или ошибочности?). В связи с этим очевидна необходимость постановки новых задач по изучению, точнее, уточнению геологического строения ледникового покрова Антарктиды и её подлёдных структур. Изучение должно включать в себя не только исследование «озера Восток» (депрессии Восток как геологического образования), но и динамики движения поверхности и глубинных слоёв ледника. В рамках этих задач должны быть проведены дополнительные геолого-геофизические, гляциологические и климатологические работы непосредственно на материке как во внутриконтинентальных, так и в прибрежных районах. Полезным будет и пересмотр уже имеющихся в нашем распоряжении радиолокационных, сейсмических и гляциологических данных. Необходимость постановки таких работ уже давно назрела. По мнению автора, глобальной задачей предлагаемых исследований будет являться определение наличия и области распространения жидкой воды под ледником и взаимосвязи процессов, происходящих в леднике, с наличием этой жидкой воды. В качестве первостепенных можно выделить следующие задачи:

1. Необходимо уточнение величины теплового потока в различных областях материка.

2. Определение наличия таяния нижней поверхности ледника в различных областях с помощью бурения льда за пределами «озёр».

3. В случае наличия жидкой воды подо льдом необходимо уточнение области её распространения.

4. Необходимо уточнить наличие подледникового стока этой воды в окружающие моря.

5. Наличие вертикального движения льда может быть подтверждением существования донного таяния.

6. Если на поднятиях каменного основания донное таяние минимально или отсутствует, то здесь может существовать самый древний лёд на планете.

7. Движение ледника в горизонтальном направлении при включении в этот процесс нижележащих слоёв льда тесно связано с изменениями климата на планете, что становится злободневным в последнее время.

8. Изучение геологического строения подледниковой поверхности, связанное с отсутствием подледниковых озёр и наличием под ледником осадочных бассейнов, тесно связано с пониманием геологического развития как этого материка, так и в общем для планеты Земля.

9. Наличие жидкой воды под ледником и сток её в окружающие моря, возможно, позволит решить проблему её недостатка в различных районах Земли в последнее время.

Решение этих задач потребует применения различных методик и технических средств. Самыми действенными, на мой взгляд, могут быть проникновение под ледниковый покров, бурение льда и подлёдной поверхности, ну и, как само собой разумеющееся, — использование геофизических методов разведки. Вероятно, будет полезно пересмотреть имеющиеся уже геофизические и гляциологические данные, полученные в Антарктиде за всё время изучения этого материка.

ЗАДАЧИ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ РЕШЕНЫ ПРИ ПРОНИКНОВЕНИИ ПОД ЛЕДНИК

Непосредственное проникновение под ледниковый покров с помощью либо беспилотного, либо обитаемого подводного аппарата со стороны одного из прибрежных морей является первоочередным и наиболее легко выполняемым видом исследований. В настоящее время для этого уже есть определённые возможности. Они позволят получить ответы сразу на многие вопросы, связанные с наличием жидкой воды под ледником. В первую очередь необходимо рассмотреть проникновение под один из известных в настоящее время в Восточной Антарктиде шельфовый ледник, некоторые из которых изображены на рисунке ниже (рис. заключения 1). Наличие этих шельфовых ледников связано с подледниковыми каньонами, по которым как раз происходит сток талой воды и по которым может быть проведено такое проникновение. Перечислим те задачи, которые можно решить при проникновении под ледник:

Задачи, связанные с наличием жидкой воды под ледниковым покровом

1. Наличие воды в жидком состоянии за пределами шельфовых ледников в сторону материка (непосредственно в каньонах и за их пределами).
2. Наличие потока воды в каньонах в направлении от внутриконтинентальных областей в сторону прибрежных морей.
3. Состав воды под шельфовым ледником и под материковым ледниковым покровом.
4. Определение принадлежности этой воды к таянию нижнего слоя ледника.

Задачи, связанные со строением шельфовых ледников

1. Определение мощности слоя льда шельфового ледника.
2. Определение рельефа нижней поверхности льда шельфового ледника.
3. Определение области распространения шельфового ледника в сторону материка.

Задачи, связанные с распространением шельфа в сторону побережья

1. Определение распространения шельфа окраинных морей в сторону материка (положения материковой границы шельфа).
2. Существование, область распространения и размеры подлёдных каньонов.
3. Рельеф дна и возможный состав донных отложений подлёдного шельфа и каньонов.

ЗАДАЧИ ПАЛЕОГЛЯЦИОЛОГИИ

1. Определение признаков многофакторности образования и развития ледников Антарктиды.
2. Определение возраста льда, различий строения и состава, связанных с условиями их образования во внутриконтинентальных и прибрежных областях Антарктиды.

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ БУРЕНИЯ ЛЕДНИКА

В соответствии с альтернативной гипотезой, в отличие от существующих в настоящее время задач бурения во внутриконтинентальных областях, в районе станции Восток, необходимо уделить большее внимание проведению этих работ в прибрежных областях. Бурение здесь имеет ряд преимуществ, основными из которых являются незначительная удалённость от станций и небольшая мощность ледника.

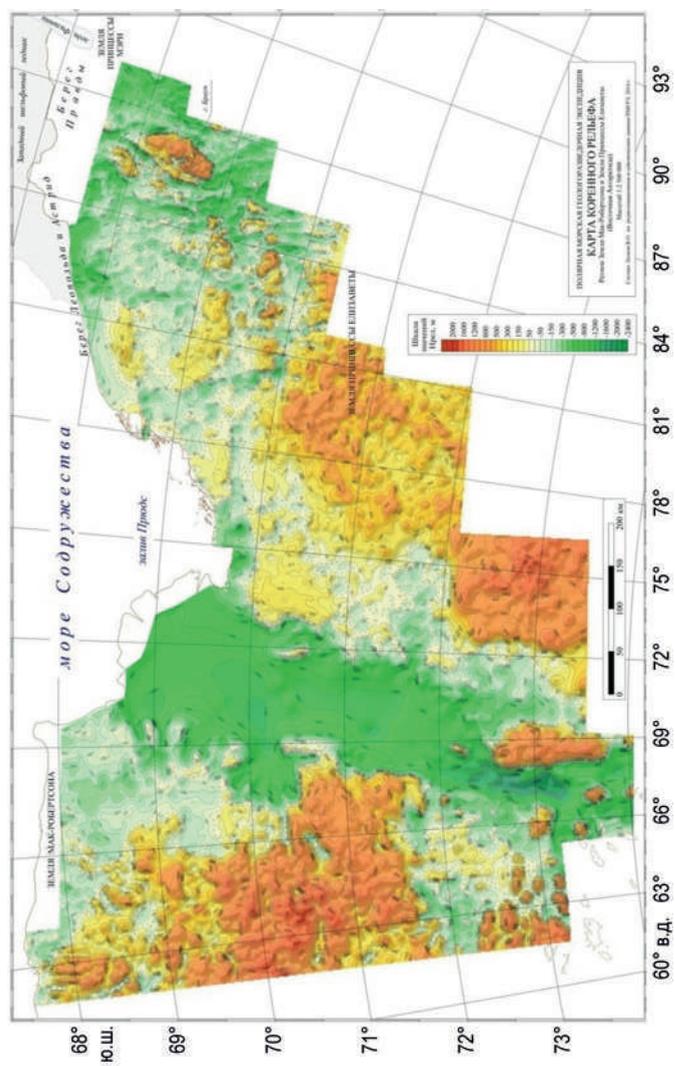


Рисунок заключения 1. Подледниковый рельеф участка побережья Восточной Антарктиды с наличием каньонов, по которым может быть осуществлено проникновение под ледник (материалы ПМГРЭ)

Основными задачами при проведении таких работ здесь будут следующие:

Задачи, связанные с наличием жидкой воды под ледником

1. Наличие жидкой воды в пределах и за пределами каньонов.
2. Наличие и параметры течения воды.
3. Химический состав подледниковой воды.

Задачи, связанные со строением ледника

1. Различие в строении ледника в областях А, Б, В в соответствии с альтернативной гипотезой.
2. Наличие во внутриконтинентальном леднике зон I, II, III в соответствии с альтернативной гипотезой и отсутствие их в областях, непосредственно примыкающих к побережью.
3. Наличие и состав минеральных включений.
4. Определение возраста нижних слоёв ледника и возможные изменения в них при движении от внутриконтинентальных областей к побережью.

Задачи, связанные с движением ледника

1. Различие в горизонтальном движении ледника в зонах I и II.
2. Отсутствие движения льда в зоне II.
3. Наличие поверхности несогласия между зонами I и II.
4. Наличие вертикального движения льда за счёт донного таяния у побережья.

Задачи, связанные с геологическим строением материка

1. Уточнение возраста слоёв льда с привлечением для этой цели дополнительных методик.
2. Определение изменений свойства льда по горизонтали и вертикали в различных областях.
3. Определение химического состава подледниковой воды.
4. Определение химического состава твёрдых включений.
5. Уточнение геологического строения, состава и физических свойств подледниковых пород.

Аналогичные задачи, кроме различий в строении и движении ледника в краевых прибрежных областях, решаются и при бурении льда во внутриконтинентальных районах.

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Для геофизических методов, как наиболее эффективных дистанционных средств изучения ледников и подледникового каменного основания, основной задачей будет являться распространение полученных предыдущими исследованиями сведений на обширные площади ледникового покрова и подлёдной поверхности. Наиболее эффективными при этом могут быть радиолокационные и сейсмические исследования.

Задачи, решаемые радиолокационными исследованиями

1. Наличие подледниковой воды и связь её с зоной III в соответствии с альтернативной гипотезой.
2. Различие в строении ледника по вертикали и горизонтали.
3. Связь строения ледника с горизонтальным и вертикальным движением льда.
4. Возможность определения состава подлёдно-подводных пород по радиолокационным данным.

5. Наличие различий в строении подлёдной поверхности и связь этих различий с геологическим составом каменного основания.

6. Определение электрофизических свойств льда, воды и подлёдных пород.

7. Уточнение скорости распространения электромагнитных волн во льду и в воде в различных областях.

Задачи, решаемые сейсмическими исследованиями

1. Изучение геологического строения подледниковых геологических структур, подобных структуре в районе российской станции Восток.

2. Определение возможного состава геологических пород, слагающих такие структуры.

3. Изучение строения ледника и подлёдной поверхности в прибрежных районах сейсмическими методами.

4. Уточнение акустических свойств ледника и подледниковых пород.

5. Уточнение скорости распространения акустических волн в леднике и каменном основании.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

Необходимость того или иного оборудования для проведения работ определяется поставленными задачами и методикой их решения. В этом разделе будут указаны необходимые требования к приборам и аппаратуре, которые планируется использовать для проведения работ.

Проникновение под ледниковый покров

Для проникновения под один из шельфовых ледников на побережье Антарктиды возможно использование беспилотных или пилотируемых подводных аппаратов. Они должны отвечать следующим требованиям:

1. Максимальная глубина погружения около 3000 м.

2. Наличие точного позиционирования по горизонтали и вертикали.

3. Наличие визуальных и аппаратных замеров рельефа нижней поверхности ледника и дна.

4. Возможность взятия проб воды, льда и донных осадков.

5. При наличии потоков воды понадобится определение их скорости и объёма стока.

6. Возможность измерения температуры воды.

7. Возможность в ходе погружения вести видео- и фотосъёмку.

Если появится возможность проникновения в водный слой под ледником через скважину, то к научной аппаратуре должны предъявляться те же требования.

Бурение льда и подлёдной поверхности

Для проведения бурения слоёв льда и подлёдно-подводного каменного основания можно будет применить как стандартное буровое оборудование для бурения льда на станции Восток, так и осваиваемое в настоящее время плавление льда с использованием соответствующей аппаратуры. Конкретные требования к ней будут зависеть от цели и выбранной методики работ.

Геофизические исследования

Для задач, решаемых геофизическими методами, может применяться как используемая в настоящее время, так и модернизированная или специально разработанная под конкретные цели аппаратура. По методам исследований можно разделить их на радиолокационные и сейсмические.

Радиолокационное оборудование. Предпочтительно размещать радиолокационное оборудование на авиационных средствах как наиболее производительных. В отдельных местах для решения конкретных задач может использоваться наземная аппаратура. При проведении исследований можно применять имеющуюся в настоящее время, модифицированную или специально разработанную аппаратуру, которая должна отвечать нескольким специальным требованиям:

1. Возможность изменения частотного диапазона исследований.
2. Возможность изменения глубинности исследований отдельно для верхней и нижней частей ледника.

Сейсмическое оборудование. В настоящее время имеется достаточно информативный 24-канальный сейсмический регистрирующий комплекс, оснащённый 3-D приёмниками. Можно рекомендовать его использование по методике накопления сигналов от слабых источников по аналогии с методикой наблюдений ОГТ.

Для повышения точности геофизических исследований необходимо проведение специализированных работ по определению скорости распространения электромагнитных и акустических волн по методике наклонного зондирования в различных областях Антарктиды.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В связи с тем, что высказываемые в этой работе предположения, требующие дальнейшего подтверждения, основываются на интерпретации геофизических данных, полученных в Антарктиде, необходимо понимать, как они получены и на каких физических свойствах изучаемой среды они основываются. В настоящее время они являются единственными дистанционными методами, позволяющими в той или иной степени понять, какой может быть модель строения ледника и какие процессы в нём могут происходить. И здесь очень важным является то, как мы интерпретируем полученные данные, а интерпретироваться они могут по-разному, в зависимости от точки зрения на геолого-геофизическую модель.

В связи с важностью такого подхода к интерпретации геофизических данных попробуем более или менее подробно рассмотреть эти геофизические исследования, используемые в настоящее время для изучения ледникового покрова в Антарктиде, а таковыми сейчас являются радиолокационное зондирование ледников и сейсмические исследования самого ледника и подстилающих коренных пород.

Наибольшее количество данных по ледниковому покрову и частично по подстилающим породам получено при радиолокационных исследованиях. Этот метод оказался очень эффективным и даёт очень много информации о строении ледника и о подлёдном рельефе. В связи с этим можно отдельно выделить несколько задач, решение которых позволит дополнительная интерпретация радиолокационных данных.

ЗАДАЧИ, СВЯЗАННЫЕ С ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

1. Однозначное определение признаков границы лёд-вода, вода-подстилающие породы и лёд-подстилающие породы на радиолокационных разрезах.
2. Проявление водного слоя на радиолокационных разрезах по характеру записи.
3. При наличии слоя жидкой воды между ледником и подстилающими породами необходимо учитывать этот слой при расчётах положения подлёдной или подводной поверхности каменного основания, принимая во внимание скорость распространения электромагнитных волн в воде.

Методика радиолокационных исследований и возможная интерпретация данных этого метода приведены в Приложении 2.

То же, т.е. пересмотр и дополнительная интерпретация может относиться и к сейсмическим данным. В Приложении 3 приведены краткие сведения об этом методе и возможности интерпретации сейсмических данных с помощью разработанной автором методики наложения теоретического годографа на реальные сейсмограммы, полученные в ходе исследований.

В данном приложении по материалам многочисленных публикаций, с небольшими комментариями автора, не затрагивающими сути рассматриваемых здесь предположений, представлены сведения из открытых источников, авторами которых являются приверженцы общепринятой гипотезы существования «озера Восток» (далее в этом приложении название будет без кавычек, так как речь будет идти как о реально существующем для них образовании). Будет затронута проблема интерпретации имеющихся в распоряжении автора данной работы геофизических данных, так как они являются основой изучения как самого ледника, так и подледниковых структур.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ИЗУЧЕНИЯ ОЗЕРА ВОСТОК

По версии интернет-издания «Словари и энциклопедии на Академике», гипотезу о существовании огромного подледникового озера под станцией Восток выдвинул Андрей Петрович Капица после обработки результатов Первой советской антарктической экспедиции 1955—1957 гг. [19].

У В.М. Котлякова можно найти следующее высказывание [21]: «В 1959 г. флаг-штурман авиационного отряда 4-й Советской антарктической экспедиции Р.В. Робинсон (1960) при полётах в районе станции Восток обратил внимание на значительные участки, резко отличавшиеся от остальной поверхности, когда самолёт пролетал в стороне от них и угол зрения наблюдателя по отношению к поверхности шита был очень мал. Теперь понятно, что штурман обнаружил именно то место, где впоследствии было обнаружено огромное подлёдное озеро». Там же: «В 1959 и 1964 гг. при сейсмозондировании в Центральной Антарктиде А.П. Капица получил сейсмограммы в районе станции Восток с двумя отражениями на глубинах 3 730 и 4 130 м. Тогда отражения интерпретировались им как границы ледниковых отложений и коренных пород».

По словам же И.А. Зотикова [14]: «в 1960 году после первой зимовки, используя имеющиеся к тому времени данные по толщинам льда, температуре его поверхности и величинам скоростей движения частиц льда, я обнаружил, что в условиях, когда ко дну ледникового покрова подходит снизу постоянный, хоть и маленький, поток тепла из недр Земли — геотермальный поток — у дна ледника на огромной территории его центральной части температура равна температуре плавления льда, более того — идёт непрерывное его плавление... Ну, а уж если есть непрерывное таяние льда, должны существовать и подледниковые озёра этой талой воды... Талая вода заполняет углубления в подледниковом ложе и образует подледниковые озёра».

Когда начали проводиться аэрорадиолокационные зондирования ледников Антарктиды, то отдельные выровненные участки подлёдного рельефа сразу стали отмечаться как отражения от подледниковых озёр. Другие варианты возможной природы этой границы не рассматривались.

В июне 1996 года в журнале *Nature* была опубликована статья группы авторов: А.Р. Kapitsa, J.K. Ridley, G. De, Q. Robin, M.J. Siegert, & I.A. Zotikov под названием «A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica» [46]. В этой статье А.П. Капица изменяет своё мнение о природе наблюдаемых отражений. В ней эти же отражения признавались уже как отражения от ice-water interface (границы лёд-вода) и от lake floor (дна озера). Эта публикация, видимо, и послужила отправной точкой начала изучения предполагаемого подледникового озера, и все последующие исследования были направлены на это.

В 1990 г. началось бурение скважины на станции Восток, которое с небольшими перерывами длится по настоящее время. В феврале 2012 г. скважина на глубине 3769,3 м (по керну) достигла слоя жидкой воды. Вода поднялась в забой скважины на высоту 569,3 м [9]. Это явилось неожиданностью для исследователей, так как плотность буровой жидкости (смесь авиационного топлива ТС-1 и фреона F-141b) подбиралась с расчётом компенсации только выбираемого при бурении льда и составляла 905 кг/м³. Подъём воды планировался, но на значительно меньшую величину. Как было отмечено В.В. Лукиным в пресс-релизе ААНИИ, «...согласно принятой технологии в сезоне 2011/12 г. должно быть проведено проникновение в озеро. Через год, в сезоне 2012/13 г. будет проведено бурение “свежезамороженного” льда, образованного из озерной воды, поднявшейся по стволу скважины с оставлением “ледяной пробки” толщиной 5—10 м.» [32]. Или в другой публикации: «...В конечном счете предполагается, что скважинное давление будет меньше озерного на 0,3—0,4 МПа, что обеспечит подъем озерной воды на 30–40 м» [9].

Реальный подъём воды на такую большую высоту (более 500 м) говорит о том, что гидростатическое давление под ледником оказалось значительно выше расчётного. Тем не менее этим было в очередной раз подтверждено, что жидкая вода под ледником в Антарктиде действительно существует. Подъём жидкой воды в скважинах, т.е. признаки её наличия под ледником, причём значительно меньшей мощности, наблюдался и ранее при бурении других скважин не только в Антарктиде, но и в Гренландии. Сводные данные по этим скважинам приведены в табл. П.1.

При бурении скважины на станции Восток проводился анализ возраста льда в кернах. Был установлен наибольший возраст льда здесь — около 400 тыс. лет [29].

Большой объём радиолокационных и сейсмических исследований был выполнен Полярной морской геологоразведочной экспедицией (ПМГРЭ). В 1995 г. (41 РАЭ) ПМГРЭ совместно с РАЭ начала планомерное изучение этого природного феномена с помощью дистанционных геофизических методов [37]. На основе большого количества проведённых полевых радиолокационных и сейсмических исследований были получены результаты, представляющие интерес для науки как вошедшие, так и не вошедшие в публикации, но большая часть которых, по мнению автора данной работы, нуждается в пересмотре.

В настоящее время существуют две версии возникновения озера Восток. По версии В.М. Котлякова: «подлёдное озеро, скорее всего, изолировано от внешнего мира в течение миллиона лет, а может быть, и дольше» [21]. По этой версии озеро является реликтовым, оно образовалось до оледенения, пережило его и сохранилось до настоящего времени.

По словам И.А. Зотикова, «оно образовалось из талой воды, которая заполняет углубления в подледниковом ложе и образует подледниковые озёра» [14]. По этому предположению оно сравнительно молодое и образовалось в тот период, когда начался процесс донного таяния.

Современные представления об озере Восток, общепринятая гипотетическая модель, построенная на основе различных исследований

Уже более 30 лет идёт изучение и всестороннее описание геологической структуры в районе станции Восток. Ей посвящено достаточно много публикаций и диссертаций. Однако за весь период изучения её как озера не представлено ни одного ни практического, ни теоретического доказательства его реального существования. Все выводы о его существовании, строении и связанных с ним процессах имеют только в виде предположений, основанных на интерпретации данных дистанцион-

Наличие жидкой воды под ледником в скважинах в Антарктиде и в Гренландии [42]

Район проведения работ	Период проведения работ	Глубина забоя (мощность ледника?)	Подъём воды в скважине	Слой воды по данным исполнителей
Берд в западной Антарктиде (80° 01' ю.ш., 119° 32' з.д.)	1968 г.	2164 м	55 м	0,2—0,3 м
Северная часть Гренландии	Июль 2003 г.	3085 м	43 м	?
База Конен	2005/2006 гг.	2774 м	80 м	?
Ледник С в западной части Антарктиды (прототип криобота с видеоаппаратурой)	Ноябрь 2000 г. — январь 2001 г.	1226 м	—	В призабойной зоне были обнаружены похожие на сэндвич чередующиеся слои чистой воды и слон, содержащие скальные обломы
Станция Восток	Февраль 1990 г. — февраль 2012 г.	3769,3 м	30—40 м (планируемое); 569,3 м (реальное)	Считается реликтовым озером (предположительно более 1000 м)

ных методов изучения, которыми в настоящее время являются радиолокационные и сейсмические исследования.

За более чем 30-летний период изучения этого природного образования как озера, отечественными и зарубежными исследователями были установлены следующие, большей частью предположительные, но уже укоренившиеся в обществе представления об этой геологической структуре. Ниже приведены выдержки из различных публикаций.

Озеро Восток занимает обширную депрессию коренного ложа материка длиной около 300 км и шириной от 40 до 80 км, которая вытянута в меридиональном направлении и имеет слегка изогнутую форму (рис. П.1.1). Береговые склоны озера с обеих сторон представляют собой уступы (сбросы) амплитудой до 1 500 м [27].

Мощность ледникового покрова в районе озера Восток колеблется от 1 950 до 4 350 м, над акваторией озера — от 3 600 в его южной части до 4 350 м в северной [37].

В публикациях приводятся следующие данные по площади озера: согласно расчётам, площадь водного зеркала подледникового оз. Восток (с учётом островов) составляет 15 425 км² [37]. В другой публикации приведены несколько иные цифры: согласно полученным результатам интерпретации всех имеющихся материалов, площадь водного зеркала озера составляет 15 790 км² [36].

Максимально зарегистрированная мощность слоя воды в озере наблюдается в его южной части и составляет примерно 1 200 м, северная часть более мелководная со средней глубиной 300 м, объём водного тела — около 6 100 км³ [36].

В пределах акватории озера обнаружено 11 островов общей площадью 365 км², а вокруг озера выявлено 56 подледниковых водоёмов [37].

Ниже ледникового покрова и слоя воды залегают, вероятно, осадочные отложения с пластовой скоростью 4,7 км/с. Мощность осадочного слоя меняется от 400 м

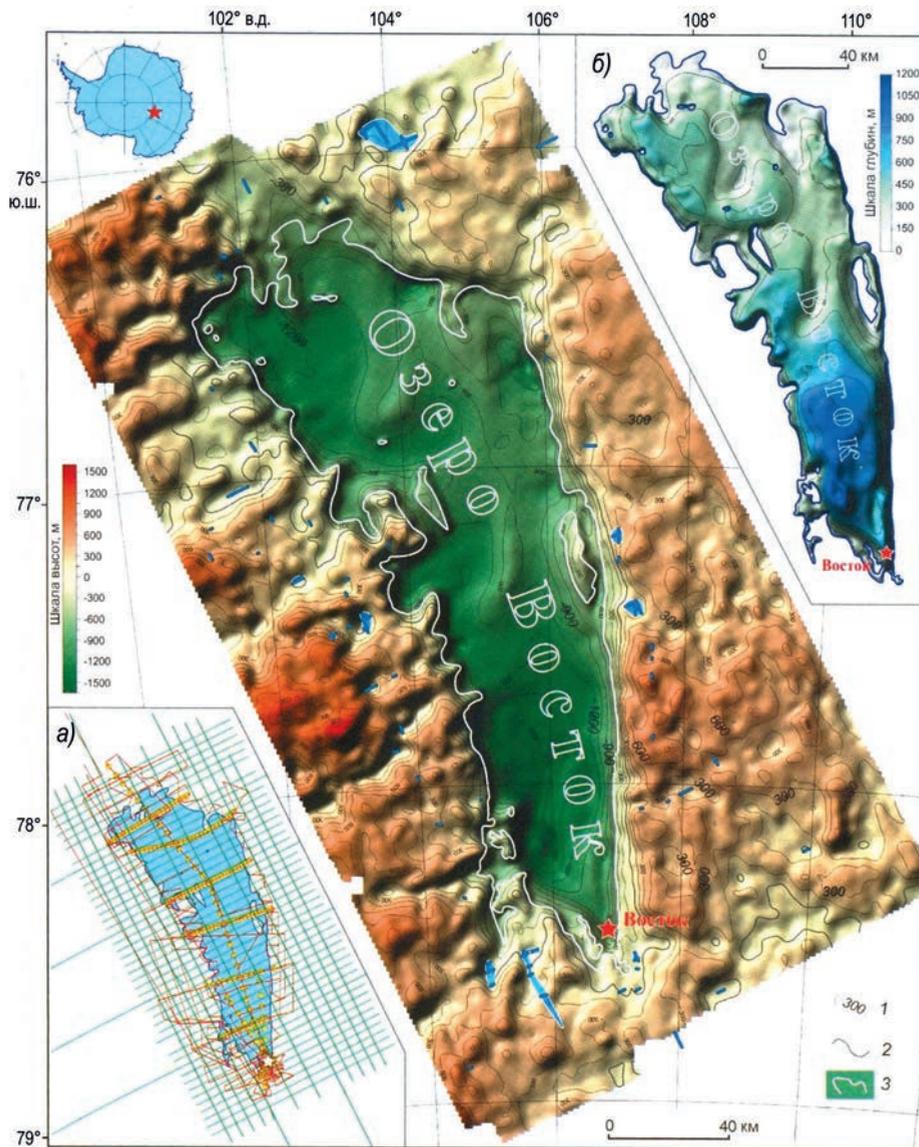


Рис. П.1.1. Коренной рельеф и подледниковые водоёмы в районе подледникового озера Восток [37]:

1 — изогипсы коренного рельефа, сечение изолиний 150 м, 2 — уровень моря, 3 — береговая линия оз. Восток; голубым цветом показаны подледниковые водоёмы. Внизу слева (а) приведена схема расположения использованных геофизических данных: красным цветом показаны отечественные радиолокационные маршруты, зелёным — маршруты американской аэрорадиолокационной съёмки LVS; жёлтые точки — пункты сейсмических зондирований МОВ. Вверху справа (б) показаны глубины оз. Восток.

на севере до 1 200 на юге. Осадочные породы залегают на фундаменте из кристаллических пород со скоростью распространения акустических волн в нём 6,3 км/с [34].

Геодезические измерения в южной части депрессии показали скорость движения поверхностного слоя ледникового покрова от 1 659 ±7 до 2 087 ±2 мм/год, направление движения (128÷134) ±0,1 градуса [48].

История бурения скважины 5Г на станции Восток и проникновения в слой жидкой воды достаточно подробно изложена в работе Н.И. Васильева с соавторами [9]. Важными для нас сведениями, приведёнными в этой работе, является плотность залывочной жидкости 905 кг/м³ и подъём жидкой воды в скважину на высоту 569,3 м.

Измеренные сейсмическим зондированием пластовые скорости распространения сейсмических волн во льду в районе станции Восток изменяются от 3,72 до 4,12 км/с [34]. При модельных построениях в ПМГРЭ обычно принимается осреднённое значение 3,9 км/с.

Осреднённая скорость распространения электромагнитных волн, измеренная методом наклонного зондирования в районе станции Восток, составила 168,5 ±0,5 м/мкс [38].

Из всех приведённых выше сведений непосредственным измерением установлены только размеры выровненного участка дневной поверхности, скорости распространения сейсмических и электромагнитных волн, мощность ледника, вычисленная по фрагментам керна, скорость движения поверхностного слоя ледникового покрова и подъём воды в скважине. Остальные чисто теоретические и предположительные. Тем не менее на основании этих сведений в большинстве публикаций модель строения озера и связанные с его существованием процессы изображаются так, как это показано на рис. П.1.2.

Учитывая ход геологического развития Земли, невозможно представить себе, что за всю историю существования геологической структуры, сформировавшейся в виде депрессии, она не заполнилась какими-либо осадками. По мнению Г.Л. Лейченкова, «незначительное количество осадочных отложений в оз. Восток противоречит существующим представлениям о древнем (более 100 млн лет назад) заложении депрессии» [26].

Современные представления о строении озера Восток по версии приверженцев общепринятой гипотезы представлены на рис. П.1.2.

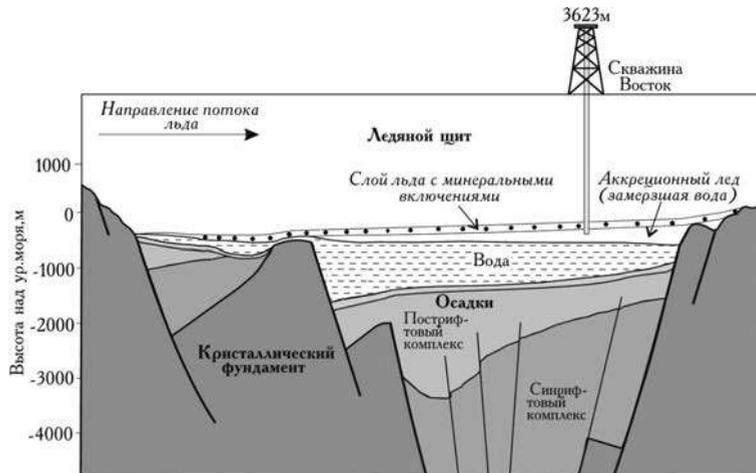


Рис. П.1.2. Современные представления об озере Восток и вмещающей его геологической структуре (по Г.Л. Лейченкову) [25] (рис. с изменениями)

Насколько реально наличие осадочного бассейна под ледником в районе расположения станции Восток?

Прогнозируемое в настоящее время незначительное количество осадков в этой структуре идёт вразрез с такими предположениями, как: «Если бы она /структура/ (прим. автора) образовалась в доледниковый период, то, находясь вблизи горных сооружений Центральной Антарктиды (горы Гамбурцева и горы под куполом Б), в условиях тёплого и влажного климата, который господствовал в то время, осадконакопление в ней должно было протекать намного активнее и осадочная толща должна была бы иметь мощность несколько километров (рис. П.1.3). Так, в оз. Байкал, которое имеет несколько сходные структурные и морфологические характеристики с оз. Восток и расположено на территории с умеренным климатом, за 35 млн лет его существования накопилось более 4 км осадков, а в Восточноафриканском рифтовом оз. Танганьика (тропическом по месту расположения) — от 3 до 4 км всего за 12—10 млн лет» [27]».

По мнению автора данной работы, приведённые здесь высказывания Г.Л. Лейченкова, касаются не действительного количества осадков в этой структуре, а общепринятым в настоящее время представлениям о них. Появляется вполне обоснованная возможность высказать предположение об образовании в подлёдной депрессии в районе станции Восток обширного осадочного бассейна с мощным слоем осадков различного генезиса. Всё встанет на свои места, если в геологической модели депрессии Восток, изображённой на рис. П.1.2, заменить водный слой предполагаемого в настоящее время озера Восток осадочными отложениями, а жидкую воду расположить тонкой прослойкой между льдом и верхней границей этих осадков. В этом случае изменяются наши представления о геологическом строении данной структуры. Такое высказывание требует доказательств и, в случае их представления, может изменить направленность изучения этой структуры уже как более типичного для Земли, но всё же в своём роде уникального осадочного бассейна.

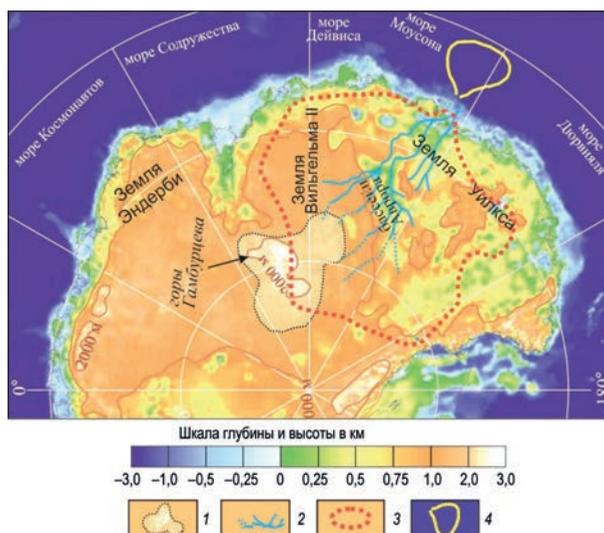


Рис. П.1.3. Реконструкция природной среды Восточной Антарктики (по Г.Л. Лейченкову и др., 2015) [26]:

1 — раннее оледенение Центральной Антарктиды (район гор Гамбурцева) в среднем-позднем эоцене, 2 — речная система среднего-позднего эоцена (бассейн Аврора), 3 — водосборный бассейн Аврора, 4 — глубоководный конус выноса средне-позднеэоценовой речной системы бассейна Аврора. Показан палеорельеф Антарктиды 34 млн лет назад.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном приложении очень коротко описываются особенности радиолокационного зондирования ледников, которое широко применяется для изучения ледников и ледниковых покровов. Физической основой использования этого метода для изучения ледяных покровов является свойство электромагнитных волн распространяться в диэлектриках и отражаться от границ раздела сред, различающихся электрическими и магнитными характеристиками. Радиолокационный метод получил в настоящее время широкое распространение, поэтому имеется значительное количество данных, полученных этим методом в Восточной Антарктиде.

Кратко о методике проведения радиолокационных исследований

Во множестве публикаций можно встретить такое пояснение методики радиолокационного зондирования ледника в его аэро-радиолокационном варианте и интерпретацию полученных с его помощью данных, а она и приводит как раз к принятой в настоящее время гипотезе о наличии под ледником подледниковых «озёр» (рис. П.2.1).

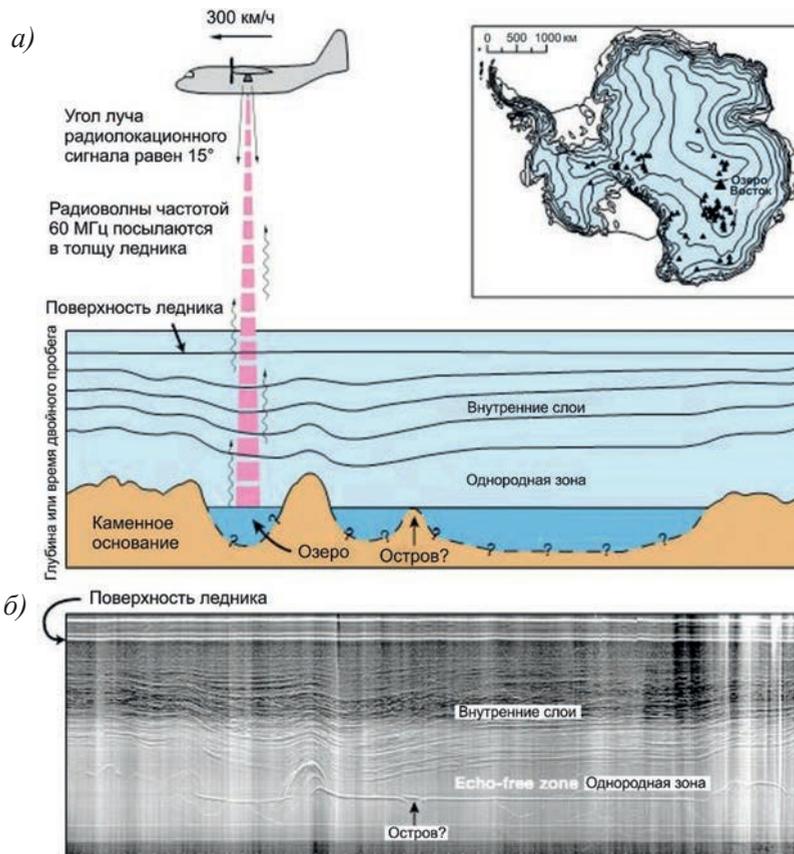


Рис. П.2.1. Принцип проведения радиолокационных исследований ледников (а) и интерпретация полученных данных сторонниками общепринятой модели (б) ([47] с изменениями)

Помимо аэрорадиолокационного варианта существует и наземная методика таких исследований с использованием передвижной техники или малогабаритных зондов, перемещаемых вручную. При любой из применяемых методик информация о леднике получается примерно одинаковой. В зависимости от используемой аппаратуры изменяется только проникающая и разрешающая способность метода. Не будем останавливаться на этих особенностях, так как больший интерес представляет именно интерпретация этих данных, ввиду того что на её основе можно выдвигать те или иные предположения о строении ледникового покрова Антарктиды и о тех процессах, которые в нём происходят.

Особенности радиолокационных записей

На всех временных разрезах, полученных радиолокационными исследованиями льда в Антарктиде, можно увидеть практически одну и ту же картину, которая несколько изменяется от района к району, особенно эти различия заметны при приближении к побережью (см. главу 4).

На радиолокационных разрезах, полученных во внутриконтинентальных районах Антарктиды и отчасти в прибрежных областях, хорошо различимы три характерные области или зоны, которые можно разделить условными границами (рис. П.2.2).

Верхняя, неширокая зона I на рис. П.2.2 является верхней частью ледникового покрова, в неё входит слой свежеснежавшего снега, фирна и слой сформировавшегося

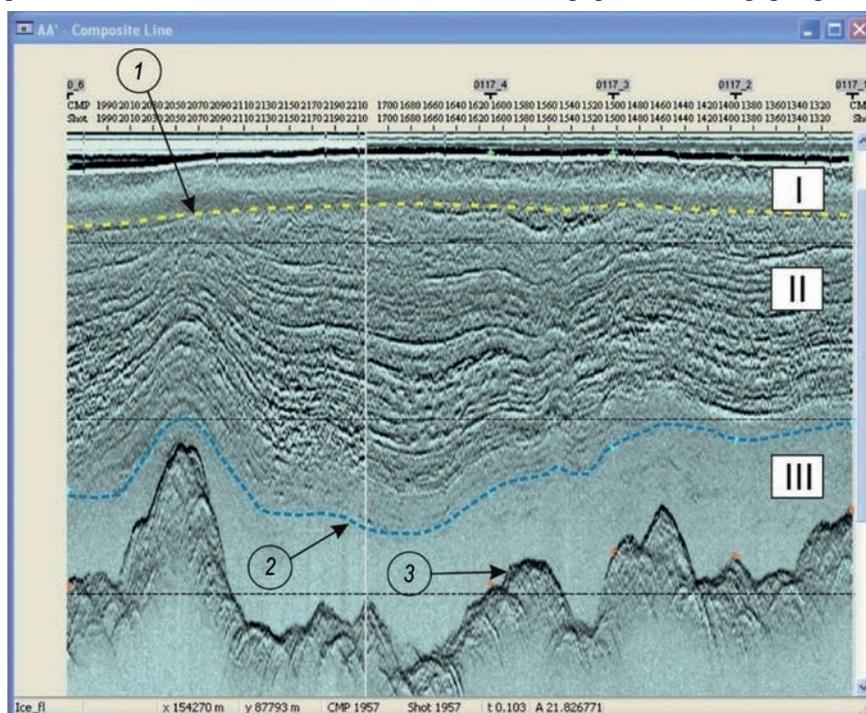


Рис. П.2.2. Вертикальное зональное строение ледникового покрова Восточной Антарктиды (материалы радиолокационных исследований ФГУНПП «ПМГРЭ»)

Зоны в ледниковом покрове: I — верхняя (подвижная?), II — средняя (главная, неподвижная?), III — нижняя однородная;

1 — граница несогласия между зонами I и II, 2 — условная граница между зонами II и III, 3 — подстилающее каменное основание

гося молодого льда. По характеру записи она отличается от нижележащей практически полным отсутствием хорошо выраженной слоистости, её мощность можно оценить в 300—400 м. Эту зону можно сопоставить с верхней подвижной приповерхностной зоной, о которой говорилось в главе 3.

От нижележащей зоны ледника с уже хорошо выраженной слоистостью она отделена поверхностью несогласия (граница 1 на рис. П.2.2). Наличие такой границы как раз может быть связано с горизонтальным движением верхних слоёв ледника.

Ниже по разрезу расположена зона с хорошо выраженной слоистостью (зона II на рис. П.2.2)). Причиной её возникновения является, видимо, наличие в слоях льда различных примесей, влияющих на форму принятых радиолокационных сигналов. Пояснения возникновения такого вида записи на радиолокационных временных разрезах показано на рис. П.2.3.

Ниже слоистой зоны II на радиолокационных записях практически повсеместно, за исключением крайних прибрежных областей Антарктиды, наблюдается в основном однородная зона (зона III на рис. П.2.2), отделяемая от вышележащей условной границей (граница 2 на рис. П.2.2). На рис. П.2.1 она названа, как принято её называть в англоязычных публикациях: «Echo-free zone».

Ниже неё на радиолокационных временных разрезах хорошо прослеживаются довольно интенсивные границы от каменного основания (граница 3 на рис. П.2.2), что говорит о значительной амплитуде принятых электромагнитных волн даже на значительной глубине под ледником, т.е. о незначительном ослаблении сигнала вышележащими слоями.

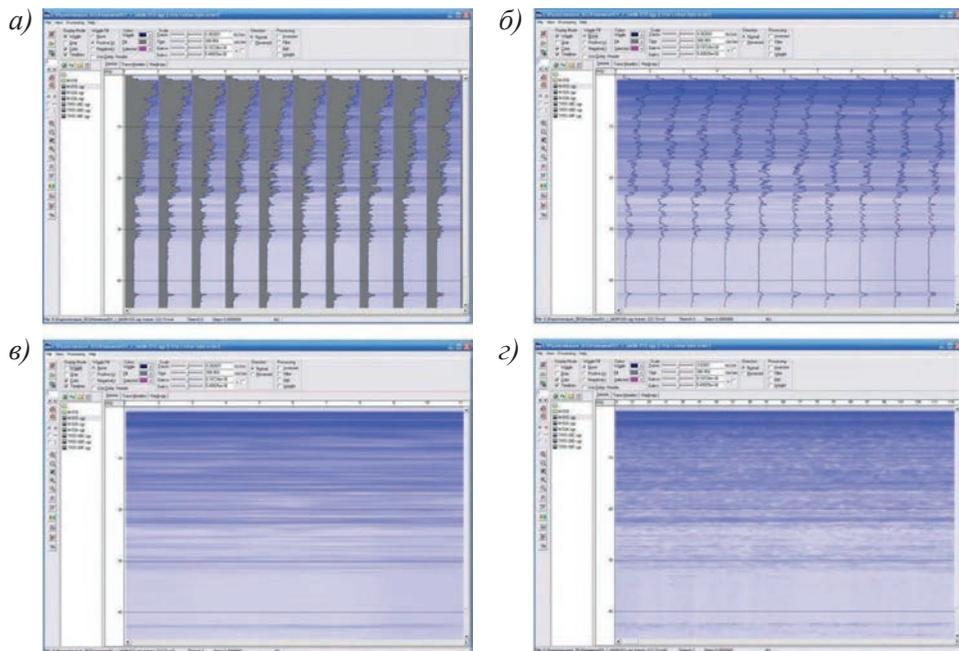


Рис. П.2. 3. Формирование слоистости на временных радиолокационных разрезах при визуализации последовательных записей принятых электромагнитных волн (материалы ПМГРЭ): Показан фрагмент аэроадиолокационного маршрута из 10 последовательных записей: *а* — визуализация записей с огибающей сигнала заливкой и закрасиванием амплитуд, *б* — с огибающей сигнала без заливки, *в* — без огибающей сигнала, *г* — то же, горизонтальный масштаб уменьшен в 10 раз (100 записей)

На радиолокационных записях, показанных на рис. П.2.3, на фоне постепенно уменьшения амплитуды принятых электромагнитных волн, происходящего вследствие рассеяния и поглощения сигнала средой, наблюдаются локальные изменения его интенсивности («провалы» огибающей), хорошо заметные на рис. П.2.3а, б, связанные, видимо, с изменением физических свойств изучаемой среды. В то же время амплитуда сигнала ниже однородной зоны остаётся достаточно большой для уверенного выделения границы, с которой связано это отражение.

Такие особенности радиолокационной записи в слоистой зоне и являются, видимо, отражением климатических изменений, повлиявших на условия осадконакопления, которые можно считать поверхностями напластования или изохронными поверхностями, о которых говорилось в главе 1. Такие характерные изменения амплитуды радиолокационного сигнала могут проследиваться на большие расстояния, что говорит о значительных масштабах одновременного накопления слоёв льда на больших площадях примерно в одинаковых климатических условиях.

Вследствие такого разнообразного характера записи при радиолокационных исследованиях очень важно правильно интерпретировать причины возникновения той или иной формы принятого сигнала. Особенно важным для нас является формирование условных границ 1 и 2 и различных зон I, II и III на рис. П.2.2. Чтобы понять, как они могут образоваться на радиолокационных временных разрезах, необходимо хотя бы кратко рассмотреть физические основы данного метода.

Кратко о физических основах радиолокации ледников

Физически использование этого метода при изучении строения ледникового покрова основано на различии таких свойств изучаемых веществ, как диэлектрическая проницаемость и проводимость. Эти различия являются причиной наличия в изучаемой среде отражающих или преломляющих границ между слоями с имеющимися в них особенностями. Эти различия так или иначе проявляются в получаемых данных при зондировании ледников высокочастотными электромагнитными импульсами, как, например, в зонах II и III на рис. П.2.2. Рассмотрим, как может формироваться сигнал на радиолокационных разрезах на границах 2, 3 и в зоне III более подробно.

В некоторых публикациях, посвящённых изучению ледников радиолокационными методами, вещества, слагающие модель, принимаются как чистые диэлектрики и обычно учитываются только их диэлектрические проницаемости. В теории это, возможно, и верно, но на практике мы имеем дело с реальными льдами, которые могут содержать посторонние примеси в виде вкраплений частиц геологических пород с различными минералами. Возможный состав таких вкраплений является темой отдельной работы. Отметим только, что на частотах проведения радиолокационных исследований электрофизические свойства изучаемой среды, а для нас это лёд, вода и различные вкрапления, могут быть свойственны как диэлектрикам, так и в различной степени проводникам.

В физике электромагнитных волн для определения того, является ли среда проводником или диэлектриком, вводится понятие комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_k . Она учитывает как величину абсолютной диэлектрической проницаемости, так и проводимость среды [12]:

$$\epsilon_k = \epsilon - j \frac{g}{\omega}, \quad (\text{П.2.1})$$

где ϵ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (Ф/м), $j = \sqrt{-1}$ так называемая мнимая единица, g — удельная электрическая проводимость (См/м), ω — угловая частота (рад/с).

Расчёт коэффициента отражения $P_{\text{отр.}}$ электромагнитных волн на границе двух сред, которые нельзя считать абсолютными диэлектриками или проводниками, так как в них могут присутствовать и токи проводимости как в проводниках, и токи смещения как в диэлектриках, должен определяться через отношения комплексных значений волнового сопротивления Z'_0 первой и второй среды:

$$Z'_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_k}}, \quad (\text{П.2.2})$$

где: μ — магнитная проницаемость среды (Гн/м), ϵ_k — комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

Вещества, входящие в нашу модель, как правило, немагнитны, и при расчётах значение μ можно принять равным 1. В соответствии с тем, что вещества, входящие в нашу модель, обладают комплексной диэлектрической проницаемостью, коэффициенты отражения и прохождения на границах двух сред должны определяться как отношение отражённой комплексной энергии $\dot{E}_{\text{отр.}}$ к падающей комплексной энергии $\dot{E}_{\text{пад.}}$ или из отношения комплексных значений волнового сопротивления Z'_0 первой и второй среды:

$$P_{\text{отр.}} = \frac{\dot{E}_{\text{отр.}}}{\dot{E}_{\text{пад.}}} = \frac{Z'_{02} - Z'_{01}}{Z'_{02} + Z'_{01}} \quad (\text{П.2.3})$$

Соответственно, коэффициент прохождения будет определяться как отношение прошедшей комплексной энергии к падающей:

$$P_{\text{пр.}} = \frac{\dot{E}_{\text{пр.}}}{\dot{E}_{\text{пад.}}} = \frac{2Z'_{01}}{Z'_{02} + Z'_{01}} \quad (\text{П.2.4})$$

При этом должно соблюдаться условие:

$$P_{\text{пр.}} = 1 - P_{\text{отр.}} \quad (\text{П.2.5})$$

Соотношения П.2.1— П.2.5 должны учитываться при радиолокационных исследованиях реальных сред, которые могут быть не только чистыми диэлектриками, но и обладать проводимостью.

На границе двух сред с различными электрофизическими свойствами неизбежно происходит частичное отражение и частичное прохождение электромагнитных волн. При прохождении электромагнитных волн через определённые среды происходит их ослабление за счёт взаимодействия с молекулами вещества. Не будем здесь глубоко вдаваться в физику этих процессов, воспользуемся осреднёнными значениями имеющихся в публикациях диэлектрической проницаемости и проводимости тех геологических пород, которые участвуют в нашей модели. Определить, какая часть энергии теряется при отражении и какая при прохождении через изучаемую среду, т.е. коэффициенты отражения и прохождения, можно будет с помощью выражений П.2.3, П.2.4 и П.2.5, при значениях электрофизических свойств льда, воды и подстилающих пород, приведённых в таблице П.2.

Приведённые в таблице значения относительной диэлектрической проницаемости на частоте около 60 МГц, которая наиболее широко используется при радиолокационных исследованиях ледника в Антарктиде, для различных пород различа-

ются не так значительно, как значения их проводимости, которые изменяются на порядки, а такие различия весьма существенны при определении коэффициентов отражения и прохождения.

Наиболее важным для нас является рассмотреть эти коэффициенты для границы льда и воды, а также воды с подстилающими породами. Рассматривать границу воздуха со снежно-фирновым слоем и его со льдом не будем, так как если мы получаем отражения от подлёдных границ, значит, электромагнитные волны ослабляются на них незначительно.

Исходя из приведённых в таблице электрофизических свойств льда и воды по формуле, учитывающей комплексную диэлектрическую проницаемость, получается следующее значение коэффициента отражения на границе лёд–пресная вода — 0,057, и коэффициент прохождения для этой границы равен 0,943. Таким образом, на границе льда и пресной воды отражается очень малая часть падающей энергии, большая часть её проходит в воду. Полученное значение коэффициента отражения на границе льда и воды очень низкое, поэтому весьма странным является предположение о выделении этой границы на радиолокационных разрезах как наиболее яркой и контрастной. Скорее наоборот, при таком коэффициенте отражения от неё определить эту границу на радиолокационном разрезе будет весьма затруднительно.

Вторым важным вопросом, в связи с этим, является предположение приверженцев общепринятой гипотезы о том, что электромагнитные волны через пресную воду не проходят и получить границу между водой и подстилающими породами невозможно. Действительно, затухание (или поглощение Γ , измеряемое в децибелах на метр) электромагнитных волн в солёной морской воде велико, но в пресной воде оно соизмеримо со значениями для льда. Для пресной воды поглощение составляет 0,18 дБ/м, а для льда оно зависит от его температуры и частоты сигнала при радиолокационных исследованиях. На частотах радиолокационных исследований 60 МГц, которые здесь анализируются, оно составляет также десятые доли децибела на метр. Данные практических исследований сравнения поглощений во льду и в воде представлены на рис. П.2. 4.

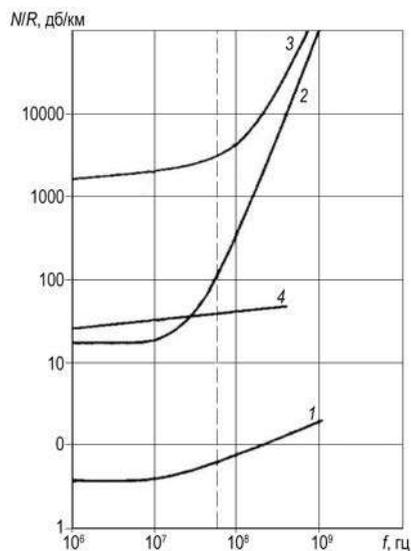


Рис. П.2.4. Кривые удельного ослабления электромагнитных волн во льду и воде [6]:

1 — дистиллированная вода, 2, 3 — пресная вода, 4 — пресный лёд. Пунктирной линией показана частота, применяемая при радиолокационных исследованиях ПМГРЭ (60 МГц)

Осреднённые электрофизические свойства льда, воды и подстилающих пород [4, 11]

Геологическая порода	Статическая относительная диэлектрическая проницаемость, Ф/м	Относительная диэлектрическая проницаемость, на частоте около 60 МГц	Проводимость, См/м
Лёд	100	3,17	10^{-8}
Вода пресная	80	80	10^{-3}
Гранит влажный	10	10	10^{-3}
Глины	10	10	4

Исходя из графиков, приведённых на рис. П.2.4, пресная вода достаточно прозрачна для электромагнитных волн. Это даёт основание предположить, что электромагнитные волны способны пройти слой воды в несколько десятков метров, отразиться от границы воды и осадков и быть зафиксированы приёмной аппаратурой. В нашем случае слой воды предположительно составляет около 100 м (см. главу 1) и получение отражений от границы воды и подстилающих пород вполне реально. Вопрос, видимо, сводится к тому, как интерпретировать эту границу на радиолокационных разрезах.

Есть достаточно оснований предположить, что принимаемое приверженцами общепринятой модели высокоамплитудное отражение ниже однородной зоны не является отражением от границы между льдом и водой, а может быть отражением от границы между водой и какими-то геологическими породами, возможно, осадочного происхождения. Проверке правильности такого предположения была посвящена отдельная глава (см. главу 5), здесь на основании соотношений 1—5 и данных из таблицы приложения 2 попробуем рассмотреть возможные значения коэффициентов отражения от такой границы.

Если подстилающие породы будут представлены глинами с высокой проводимостью (см. таблицу П.2), то коэффициент отражения на границе воды и этих осадков будет равен 0,589, т.е. от неё отразится более половины электромагнитного излучения. Ледник содержит значительное количество минеральных включений различного состава [30]. В подтверждение этого можно привести возможный состав минеральных вкраплений, обнаруженных в массе ледника (рис. П.2.5), которые в

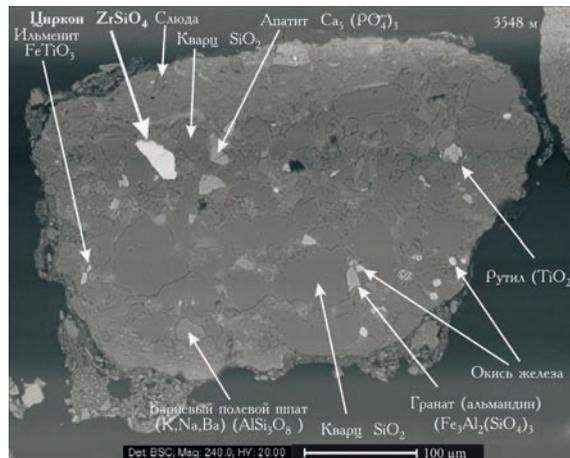


Рис. П.2.5. Минеральный состав исследованной части твёрдого включения из ледового ядра с глубины 3548 м [25]

случае их вытаявания за многолетнюю историю существования ледникового покрова могут оседать на дно подледникового водоёма в виде пелитов.

В состав таких вкраплений входят металлы, которые обладают повышенной проводимостью, а это может служить дополнительным фактором увеличения амплитуды отражённого сигнала от границы, где они присутствуют.

Если под ледником имеются места, где отсутствует донное таяние и лёд лежит непосредственно на каменном основании, представленном гранитами (видимо, здесь они всё же тоже влажные), то коэффициент отражения на границе льда и каменного основания в этом случае равен 0,635, что максимально из всех представленных ранее. В этом случае использование радиолокационного метода для обнаружения такой границы вполне оправдано.

В заключение можно привести ещё один пример правомочности подхода к определению коэффициента отражения, учитывающего электропроводность вещества. Если представить, что под ледником находится лист металла, то электромагнитные волны должны от него отразиться полностью и радиолокационным методом он должен быть обнаружен обязательно.

Если при расчётах коэффициента отражения и прохождения рассматриваются немагнитные материалы и в расчётных формулах значение магнитной проницаемости среды принимается равным единице, то для такого эксперимента можно взять медь, у которой как раз такое значение магнитной проницаемости, а относительная диэлектрическая проницаемость лежит в пределах от 1 до 10, но значение проводимости равно $5,7 \cdot 10^7$ См/м [12]. Если такой воображаемый медный лист окажется подо льдом, то по расчётам от него отразится 0,999 энергии электромагнитных волн. Такой же результат получим, если такой медный лист будет находиться под слоем пресной воды. Хотя, если учитывать только диэлектрическую проницаемость меди, то отражения электромагнитных волн от такого листа ни в том, ни в другом случае вообще может не быть, однако это противоречит законам физики.

Если правомочны высказываемые здесь предположения о принадлежности нижнего однородного слоя, фиксируемого на радиолокационных данных, слою воды, то интересно будет определить его мощность по этим данным. Здесь важным становится пересчёт временных разрезов в глубинные с учётом скоростей распространения электромагнитных волн в этих средах. Из публикаций известно, что во льду она равна примерно 170, а в воде 33 м/мкс [5]. Таким образом, с учётом такой скорости распространения электромагнитных волн в воде мощность нижнего однородного слоя может быть в пределах десятков или первых сотен метров. Это необходимо учитывать при интерпретации имеющихся радиолокационных разрезов.

Такой подход к анализу радиолокационных данных предоставляет нам возможность пересмотреть общепринятую модель строения ледникового покрова и считать приведённые на рис. П.2.2 границу 2 как границу между льдом и водой, зону III — как слой жидкой воды, а границу 3 — как границу между водой и каменным основанием. Из этих соображений на полном основании были интерпретированы радиолокационные данные в этой работе.

На радиолокационных разрезах в местах примыкания нижней контрастной границы к границе от каменного основания возникают искажения в положении этой границы (см. рис. 2.1 в разделе 2.1). Попробуем определить, связано ли это с наличием под ледником низкоскоростного тонкого (относительно мощности ледника) слоя жидкой воды.

Причины искажений положения нижней контрастной границы на радиолокационных разрезах

На радиолокационных разрезах, полученных в районе депрессии Восток как зарубежными исследователями, так и специалистами Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ), заметно изменение наблюдаемого времени нижней контрастной границы, причём такие изменения имеют место на временных радиолокационных записях, полученных как при аэрогеофизических, так и при наземных исследованиях (см. рис. П.2.6). Обращает на себя внимание тот факт, что все подобные изменения наблюдаются только вблизи смены характера этой границы и резких изменений рельефа вышележащих слоёв льда.

При этом на радиолокационных разрезах изменения наблюдаемого времени могут быть как в большую (визуально вниз, на рис. П.2.6 выделено зелёными стрелками), так и в меньшую (визуально вверх, на рис. П.2.6 выделено синими стрелками) сторону.

Такие изменения или искажения не могут быть объяснены специфическим прилеганием водной «поверхности “озера Восток”» к каменному основанию (см. раздел 2.1), но наличие их всё же должно иметь какое-то объяснение. Чтобы определить природу таких искажений, опять же предположим, что однородный слой между ледником с хорошо выраженной слоистостью и каменным основанием является тонким слоем жидкой воды различной мощности, и попробуем с помощью моделирования определить, как это может отразиться на временном радиолокационном разрезе.

При моделировании, будем учитывать, что скорость распространения электромагнитных волн во льду меняется в зависимости от температуры, состава льда в небольших пределах и может быть равна 168—170 м/мкс.

Скорость распространения электромагнитных волн в воде не зависит от внешних и внутренних факторов и равна 33 м/мкс, что значительно ниже, чем во льду. Такая разница в скоростях как раз и может приводить к искажению формы отражающей поверхности на радиолокационной записи при изменении мощности низкоскоростного слоя жидкой воды.

Чтобы проверить это предположение, попробуем смоделировать, как наличие низкоскоростного слоя в модели может изменять наблюдаемое время на радиолокационных разрезах. Будем моделировать двухслойную среду при высокой скорости распространения электромагнитных волн в верхнем слое и низкой скоростью в нижнем. При построении модели будем определять время прихода волны (t) от нижней границы низкоскоростного слоя мощностью (h) при пластовой скорости распространения электромагнитных волн в этом слое (v) по формуле [13]:

$$t = \frac{2h}{v}. \quad (\text{П.2.6})$$

Будем строить модель приближённую к реальному строению ледника в районе станции Восток, в которой будет присутствовать слой фирна постоянной мощности, и слой льда, увеличивающийся на 60 м на каком-то удалении от начала профиля (рис. П.2.7). Цифры расстояния на этом рисунке примерно соответствуют километрам. Под слоем такого льда будет находиться слой воды тоже переменной мощности и ниже него строго горизонтально залегающее каменное основание (фундамент). Такая глубинная модель представлена на рис. П.2.7а).

На рис. П.2.7 изменение глубины залегания нижнего слоя льда обозначено как $(h_1 + \Delta h)$, причём, как уже сказано ранее, это изменение равно 60 м, т.е. слой воды

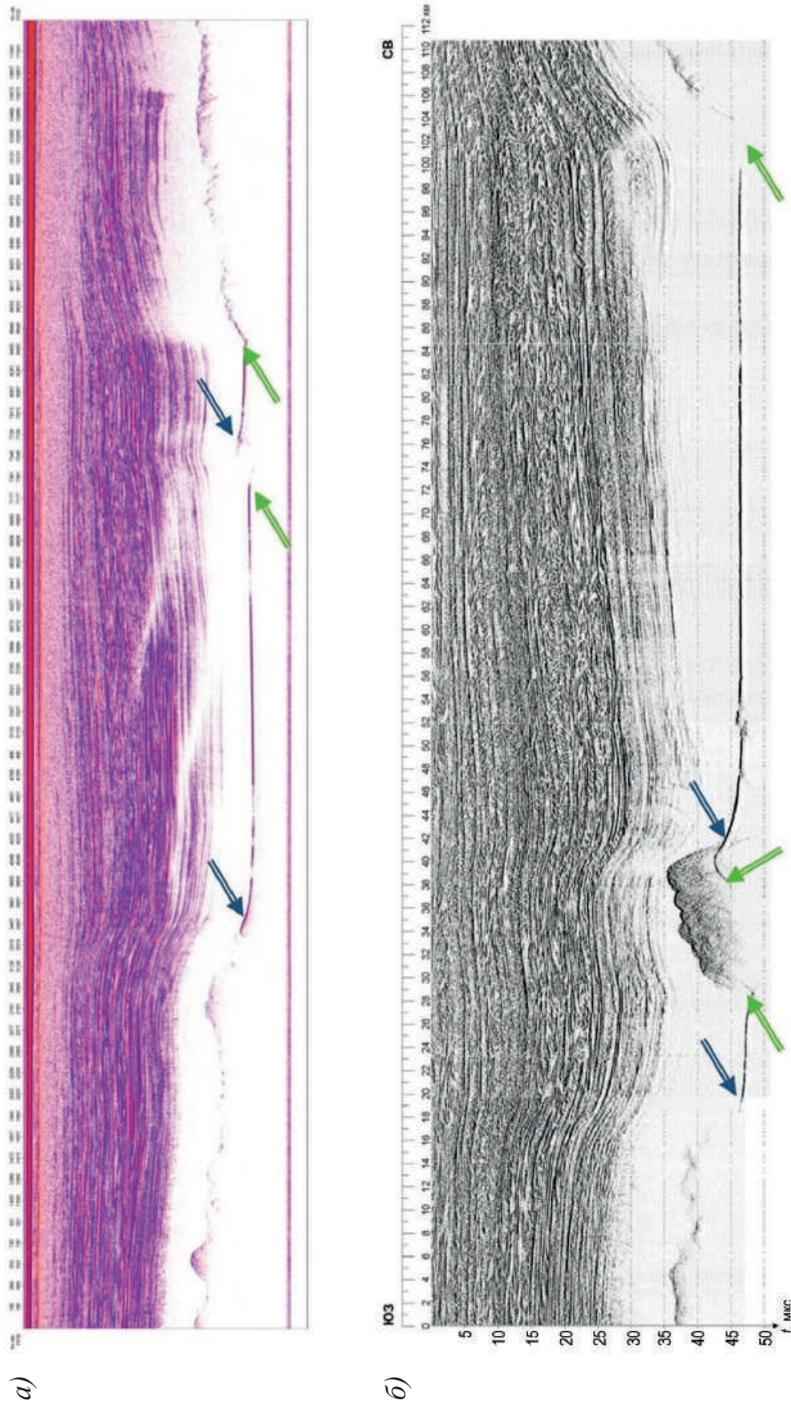


Рис. П.2.6. Изменения наблюдаемого времени от подводной (подлёдной?) границы (маршрут S51):
 а — материалы аэрадиолокационной съёмки LVS, б — наземных радиолокационных исследований ПМГРЭ.

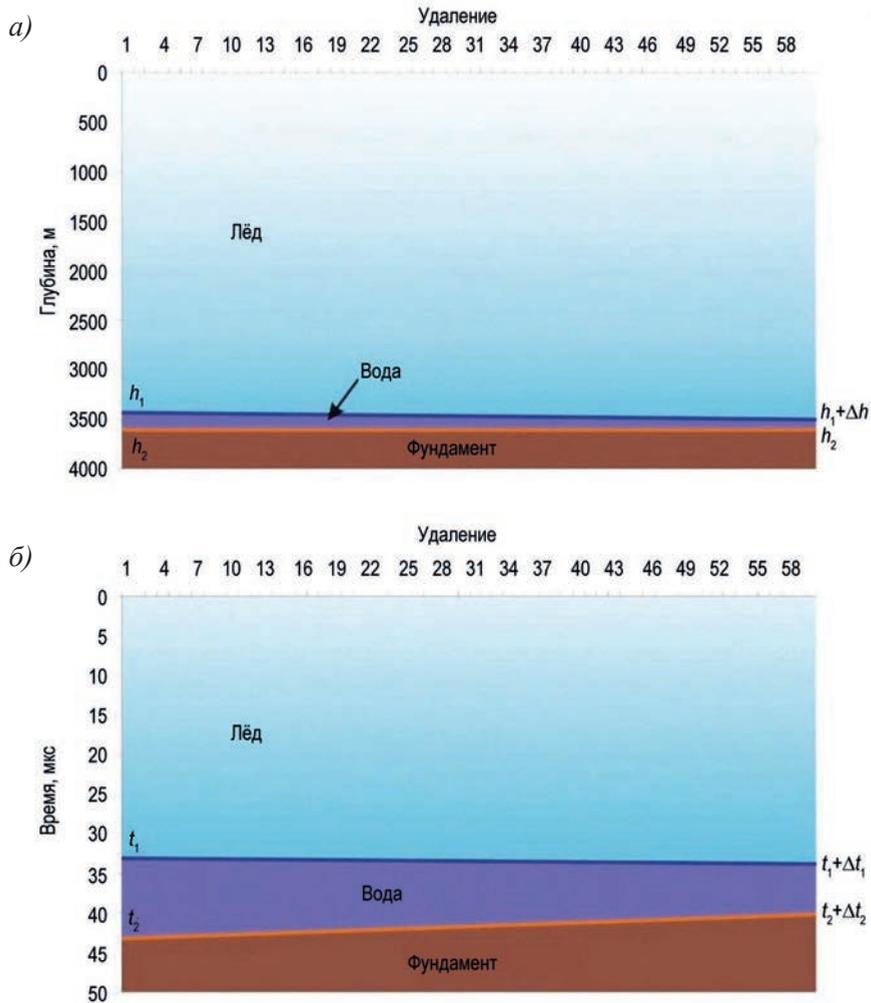


Рис. П.2.7. Глубинный (а) и временной (б) разрезы модели, содержащей низкоскоростной слой между льдом и фундаментом (каменным основанием)

меняется от 100 до 40 м, что по сравнению с мощностью ледника совсем незначительно. Глубина залегания фундамента (каменного основания), обозначенная как h_2 , одинакова в начале и в конце профиля.

Теперь по формуле П.2.6 посчитаем наблюдаемое время для этой глубинной модели во всех точках профиля для нижней поверхности ледника. Результаты этих расчётов приведены на рис. П.2.7б). Наблюдаемое время, рассчитанное для нижней поверхности ледника t_1 , отличается в начале и в конце профиля на величину Δt_1 за счёт изменения мощности льда. Как видно из представленного на этом рисунке временного разреза изменение $(t_1 + \Delta t_1)$ незначительно и практически незаметно.

Для расчётов наблюдаемого времени каменного основания или фундамента обозначим его как t_2 , воспользуемся той же формулой П.2.6, но с учётом мощности слоя воды. Если обозначить время прохождения электромагнитных волн в слое воды как t_b , то наблюдаемое время t_2 можно определить по формуле:

$$t_2 = t_1 + t_s = \frac{2h_1}{v_1} + \frac{2(h_2 - h_1)}{v_2} \quad (\text{П.2.7})$$

На временном разрезе (рис. П.2.7б) за счёт значений наблюдаемого времени для низкоскоростного слоя t_2 , определённого по формуле 7, изменение мощности этого слоя выглядит уже значительно больше, чем на глубинном разрезе. Изменение наблюдаемого времени для фундамента Δt_2 также значительно больше, за счёт чего и характер поведения наблюдаемого времени от фундамента ($t_2 + \Delta t_2$) тоже более выражен. В результате этого положение фундамента на временном разрезе наклонно, хотя в реальной глубинной модели он строго горизонтален.

Из результатов пересчётов глубинного разреза во временной можно сделать очень важный вывод — при наличии в разрезе низкоскоростного слоя переменной мощности наблюдаемые на временных радиолокационных разрезах искажения в форме и положении каменного основания (если это, конечно, не «поверхность “озера Восток”») могут объясняться наличием между ним и нижней поверхностью ледника слоя воды. Причём при уменьшении водного слоя будет визуально наблюдаться поднятие горизонтально залегающего фундамента или каменного основания (наблюдённое время уменьшается), а при его увеличении — погружение (наблюдённое время увеличивается), что хорошо видно на рис. П.2.7б). Это необходимо учитывать при интерпретации радиолокационных данных, если на них имеется изменение мощности нижнего однородного слоя, который может быть слоем воды между льдом и каменным основанием, и такое изменение может вносить изменение в положение нижележащей контрастной границы.

Представленное моделирование даёт основание предполагать реальность существования маломощного, низкоскоростного при радиолокационных исследованиях, слоя жидкой воды между ледником и каменным основанием и является ещё одним доказательством высказываемых здесь предположений.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Этот вид исследований является вторым, но при этом не менее важным при исследованиях в Антарктиде. Он более глубинный и используется, как правило, для изучения не самого ледника, а того, что находится под ним. Основная масса сейсмических данных как раз получена при проведении исследований в пределах геологической структуры, расположенной в Антарктиде в районе станции Восток, так что материалов для анализа здесь вполне достаточно (см. рис. П.1.1а). На этом рисунке показана геофизическая изученность данного района Восточной Антарктиды. На основании данных таких исследований как раз и было высказано предположение о наличии под ледником в «озере Восток» мощного слоя воды величиной более 1 000 м (рис. П.3.1).

Пример анализа данных сейсмических исследований методом отражённых волн (МОВ) и геолого-геофизическая модель по данным этого анализа приведены на рис. 5.1б в главе 5. На этом рисунке хорошо видны несколько отражающих границ, выделяемых при сейсмических исследованиях, и их интерпретация. Такая интерпретация этих границ и является в настоящее время как бы основой общепринятой модели (рис. П.3.1), но нашей задачей будет проанализировать, можно ли интерпретировать их иначе, чем это делают авторы данной интерпретации.

Альтернативная интерпретация данных, полученных этим методом в данном районе Антарктиды, уже приведена ранее (см. главу 5) и на её основе подтверждены некоторые из высказываемых в данной работе предположений. Далее коротко рассмотрим основные аспекты этого метода: — физические основы, варианты интерпретации и специальную программу, используемую для сейсмического моделирования.

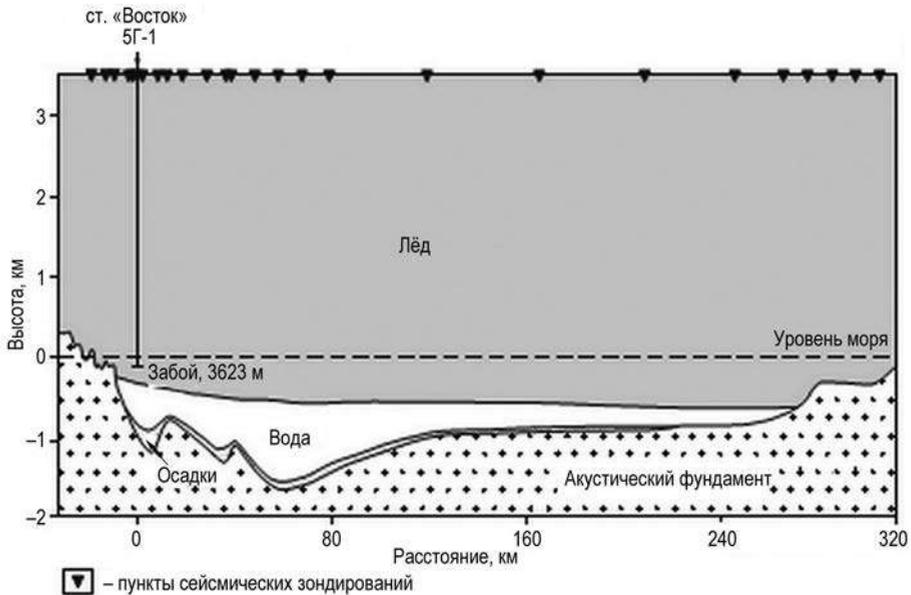


Рис. П.3.1. Сводный геофизический разрез вдоль длинной оси озера Восток [34]

КОРОТКО О ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВАХ СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ

Как и радиолокационные исследования, использование этого метода основано на различии физических свойств изучаемых геологических пород, только здесь учитываются различия в плотности и в скорости распространения сейсмических (акустических) волн. Имеется два основных сейсмических метода, применяемых в Антарктиде: метод отражённых волн (МОВ), при котором фиксируются акустические волны, отражённые от поверхностей слоёв с отличными от вышележащих свойствами, и метод преломлённых волн (МПВ), когда на поверхности фиксируются волны, преломлённые на границах раздела отдельных слоёв с различными физическими свойствами. На реальных сейсмограммах в зависимости от методики исследований могут фиксироваться как те, так и другие акустические волны продольные или поперечные.

При проведении сейсмических исследований учитывается, что интенсивность отражения от какой-либо границы зависит от её акустической жёсткости Z , т.е. для каждого i -го слоя модели она определяется как произведение плотности ρ на скорость распространения продольных волн в нём α [44]:

$$Z_i = \rho_i \alpha_i \quad (\text{П.3.1})$$

Учитывая это, коэффициент отражения R для первого и второго слоёв двухслойной модели можно определить по формуле:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{П.3.2})$$

Так как отражённые и преломлённые акустические волны формируются на границах раздела слоёв, слагающих возможную геологическую модель, при моделировании важными являются значения плотности и скорости распространения акустических волн в этих слоях. В таблице приложения 3 представлены эти примерные данные для геологических пород, вероятно, слагающих геолого-геофизическую модель депрессии Восток.

Представленные в таблице данные физических свойств геологических пород являются весьма приблизительными, так как их истинную природу мы сможем определить только тогда, когда они будут доступны для изучения. Тем не менее, предположим, что коренные подледниковые породы каменного основания в пределах депрессии Восток могут быть представлены неконсолированными (рыхлыми) или консолированными (уплотнёнными) осадочными породами.

Для указанных в таблице П.3 соответствующих плотностей для этих пород и скоростей распространения сейсмических волн во льду, в воде, в глине (неконсолированные осадки), консолированных осадках и коренных породах по формулам П.3.1 и П.3.2 получим коэффициент отражения на границе лёд–вода $-0,41$ (знак минус говорит о том, что сигнал меняет фазу). В обратном направлении из воды в лёд значение коэффициента отражения равно также $0,41$, но со знаком плюс. Такие достаточно высокие значения коэффициентов отражения могут служить причиной образования кратных волн в тонком водном слое, что может быть учтено при сейсмическом моделировании, о котором мы поговорим дальше более подробно. Пока оценим, какие могут быть коэффициенты отражения на других границах.

На границе воды и нижележащих глин коэффициент отражения равен $0,63$, что достаточно для уверенного выделения этой границы. В геологическом разрезе может также существовать граница между двумя различными типами осадков. Коэффициент отражения сейсмических волн от такой границы может быть около $0,51$, что вполне

достаточно для её выделения при моделировании. Коэффициент отражения сейсмических волн от границы между консолидированными осадками и коренными породами значительно ниже — 0,11, но этого тоже может быть достаточно для выделения её при зондированиях более глубинным методом преломлённых волн.

Для сейсмических методов разведки применимо то же правило, что и при радиолокации: общее количество энергии при отражении и преломлении должно быть равно единице. Значит, на границе между консолидированными осадками и коренными породами коэффициент преломления равен 0,89, т.е. в нижележащий слой проникает значительное количество энергии, которая в виде преломлённой волны может быть зафиксирована на некотором удалении от источника волн. Это может нам помочь при анализе сейсмических исследований методом преломлённых волн (МПВ).

Видимо, так же, как и при радиолокационных исследованиях, граница между льдом и водой не будет резкой и контрастной. Как показали исследования шельфовых ледников, скорость распространения сейсмических волн на границах раздела различных пород не меняется резко, существует некоторая переходная зона между ними. Такая зона перехода льда в воду названа «ажурный слой» (см. рис. 1.10 в разделе 1.6.4). Не исключено, что его наличие вполне может иметь место в переходной зоне между льдом и водой и под всем ледником в Антарктиде. Такое предположение, конечно, требует дополнительных исследований, но и возражений против этого в настоящее время не имеется. До настоящего времени наличие здесь резкой и контрастной границы между льдом и водой является только предположением.

Скорее всего, как при радиолокационных, так и при сейсмических исследованиях наиболее резкой и контрастной границей будет граница между водой и осадками. Дополнительным фактором в пользу этого является то, что граница между водой и глинами может быть более выровненной, чем граница между льдом и водой, и получить от неё хорошо выраженное отражение более вероятно.

Указанные в таблице П.3 значения плотности и скорости распространения сейсмических волн, а, соответственно, и приведённые расчёты коэффициентов отражения и преломления весьма приблизительны, так как пока неизвестны реальный состав осадков и их физические свойства. Это требует проведения дополнительных сейсмических исследований методами отражённых и преломлённых волн как в самой депрессии, так и за её пределами.

В главе 5 при определении возможного геологического строения депрессии Восток, подразумевающего наличие в депрессии как тонкого слоя жидкой воды под ледником, так и возможное наличие под слоем воды геологических пород различного состава, применена методика сейсмического моделирования, разработанная автором этой работы. Ниже даётся краткое описание этой методики и использованные при моделировании формулы для расчёта теоретических годографов.

Таблица П.3.

Примерные плотности и скорости распространения сейсмических волн в породах, слагающих возможную геолого-геофизическую модель депрессии Восток [4, 13, 44]

Наименование породы	Плотность, кг/м ³	Скорость распространения сейсмических волн, м/с
Уплотнённый снег		500
Фирн, материковый лёд	920	3900—3920
Вода	1000	1500
Неконсолидированные осадки	2400	1700—1800
Консолидированные осадки	2600	4700—5400
Коренные породы	2800	6000—6300

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ФОРМУЛЫ

В качестве методики сейсмического моделирования, представленного в главе 5, автором был выбран вариант наложения на имеющиеся сейсмические волновые поля реальных зондирований (полевых сейсмограмм) теоретически рассчитанных годографов преломлённых (МПВ) и отражённых волн (МОВ). Такой подход позволяет сопоставить, насколько волны, выделяемые на сейсмограммах, соответствуют теоретическим годографам отражённых или преломлённых волн, формирующихся при определённых физических параметрах изучаемого разреза — мощности слоя геологической породы и пластовой скорости распространения в нём сейсмических волн.

Для проведения такого моделирования, с одной стороны, готовились для визуализации сейсмограммы полевых наблюдений, с другой стороны, была написана программа, позволяющая производить теоретические расчёты и непосредственное наложение на сейсмограммы полевых наблюдений теоретически рассчитанные годографы.

В целом для выполнения такого вида моделирования автором было сделано следующее.

1. Для оптимального отображения имеющихся сейсмограмм в формате SEG-Yc помощью программы Sei See V 2.15.1 (программа просмотра и обработки сейсмических данных) были подобраны параметры визуализации и, в некоторых случаях, применены фильтрации и автоматическая регулировка усиления (APU), т.е. регулировка амплитуды сигнала.

2. Сейсмограммы были сохранены в виде растровых изображений в формате BMP.

3. Написана программа `Bmp_trv-mov`, позволяющая отображать сейсмограммы в удобном масштабе, задавать координаты трасса-время на сейсмограмме, задавать параметры модели и накладывать на сейсмограмму рассчитанные годографы первых вступлений МОВ или МПВ (рис. П.3.2):

При моделировании были сделаны допущения, что на изучаемой территории слои, слагающие модель, можно считать однородными, поэтому эффективные скорости принимались равными пластовым. Все предлагаемые методики обработки данных МПВ рассчитаны на монотонное увеличение пластовых скоростей с глубиной. В нашей модели возможно появление под ледниковым покровом слоя воды, скорость распространения сейсмических волн в котором значительно ниже, чем в вышележащем. В этом случае, а также при моделировании данных МОВ возникает необходимость замены двух или нескольких слоёв с различными физическими свойствами на один эквивалентный, который при одной и той же скорости в подстилающем их слое образует один и тот же годограф преломлённой волны или годограф волны, отражённой от нижележащего слоя.

Для определения средней эффективной скорости V_{cp} для нескольких обобщённых слоёв использовалась формула [13]:

$$V_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \quad (\text{П.3.3})$$

где: V_i — скорость в каждом слое, Δt_i — временной интервал распространения волны для каждого слоя.

При этом мощность эквивалентного слоя для годографов определялась как сумма мощностей всех усредняемых слоёв по формуле:

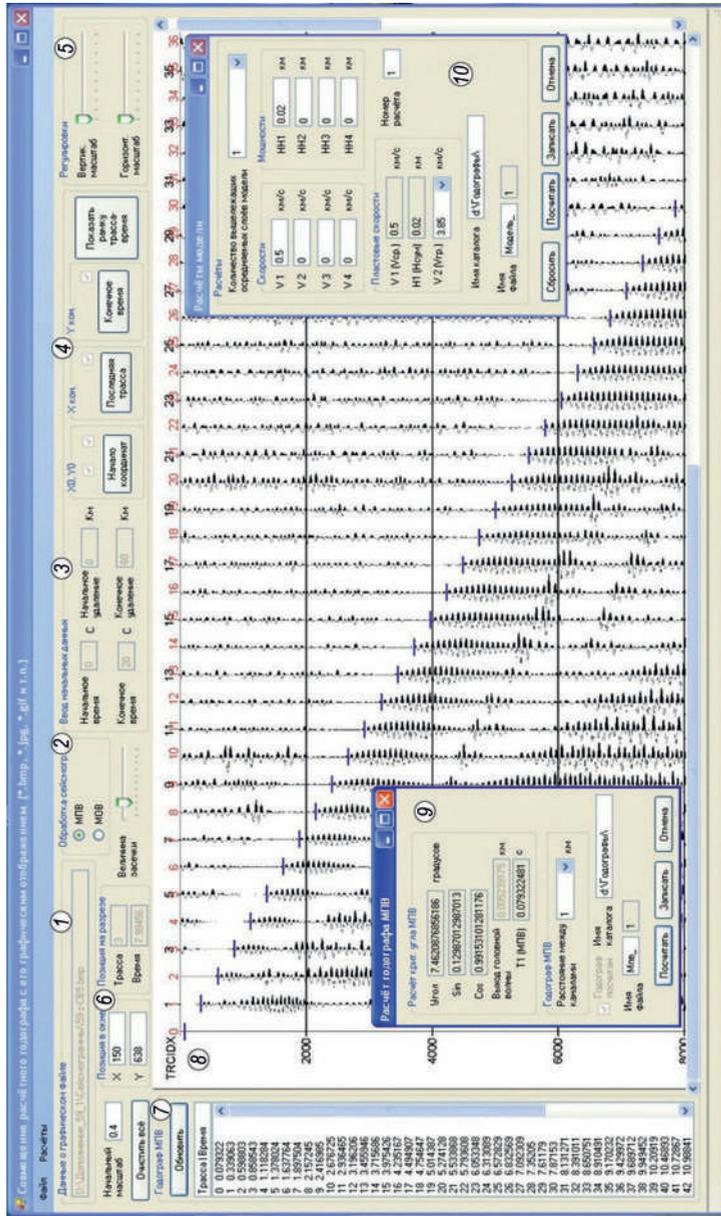


Рис. П.3.2. Интерфейс программы моделирования, основные элементы управления и результаты моделирования МПВ:

Цифрами обозначены: 1 — сведения о графическом файле сейсмограммы и задание начального масштаба её отображения, 2 — выбор режима моделирования МОВ или МПВ, 3 — задание начальных параметров (начальное и конечное время, начальное и конечное удаление), 4 — задание начальных и конечных точек на графическом файле, 5 — масштаб отображения рисунка в графическом окне, 6 — отслеживание курсора в графическом окне (в пикселях и в координатах трасса-время), 7 — таблица рассчитанных значений значений голографов, 8 — графическое окно, в котором отображается сейсмограмма, номера трасс, и графически «засечки» рассчитанных первых вступлений (синие при обработке МПВ и красные при обработке МОВ), 9 — окно расчёта вспомогательных параметров голографов, 10 — окно задания основных параметров модели (количество слоёв, мощность и скорость распространения сейсмических волн в них)

$$H_{\text{экв.}} = \sum_{i=1}^n h_i^2 \quad (\text{П.3.4})$$

где: h_i — мощность очередного осредняемого слоя.

Критический угол выхода преломлённой волны (i) определялся по формуле:

$$\sin i = \frac{V_{\text{ср.}}}{V_2}, \quad (\text{П.3.5})$$

где: V_2 — скорость в подстилающем (преломляющем) слое.

Годограф преломлённой волны для горизонтально залегающей преломляющей границы рассчитывался по формуле [45]:

$$t = \frac{x}{V_2} + T_1, \quad (\text{П.3.6})$$

где: x — удаление от точки взрыва, V_2 — скорость в подстилающем (преломляющем) слое, T_1 — начальное время наблюдения годографа МПВ, определяемое по формуле:

$$T_1 = \frac{2H_{\text{экв.}} \cos i}{V_{\text{ср.}}} \quad (\text{П.3.7})$$

Годограф отражённой волны рассчитывался по формуле:

$$t = \frac{1}{V_{\text{ср.}}} \sqrt{4(H_{\text{экв.}})^2 + x^2 + 4hx \sin(\pm\varphi)}, \quad (\text{П.3.8})$$

где: x — удаление от пункта взрыва, $\pm\varphi$ — угол падения пласта, причём знак плюс берётся при наблюдениях по падению, а минус по восстанию границы.

Начальное время наблюдения годографа МОВ (T_0) определялось по формуле:

$$T_0 = \frac{2H_{\text{экв.}}}{V_{\text{ср.}}} \quad (\text{П.3.9})$$

При моделировании использовались физические свойства пород, слагающих разрез, которые приведены в таблице П.3 Интерфейс программы Vmp_mrv-mov показан на рис. П.3.2 и на рисунках в главе 5.

Как видно из представленных в этой главе рисунков, такой способ моделирования позволяет достаточно точно подбирать свойства отдельных слоёв, т.е. параметры геолого-геофизической модели, и мгновенно видеть результат тех или иных её изменений.

Данную методику можно рекомендовать для пересмотра имеющихся в нашем распоряжении сейсмических данных МОВ и МПВ, полученных в Антарктиде в пределах депрессии Восток или в других районах, где будут проводиться такие работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас океанов. Антарктика. СПб: Изд. ГУНиО МО РФ, ГНЦ РФ, ААНИИ, 2005. 280 с.
2. Барков Н.И., Вострецов Р.Н., Липенков В.Я., Саламатин А.Н. Колебания температуры воздуха и осадков в районе станции Восток на протяжении четырех климатических циклов за последние 420 тыс. лет // Арктика и Антарктика. 2002. Вып. 1(35). С. 82–89.
3. Беховых Л.А., Макарычев С.В., Шорина И.В. Основы гидрофизики. Барнаул: АГАУ, 2008. 172 с.
4. Богородский В.В., Бенгли Ч.Р., Гудмансен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 312 с.
5. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лёд. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
6. Богородский В.В., Трепов Г.В., Фёдоров Б.А., Хохлов Г.П. Использование электромагнитных волн, распространяющихся в пресной воде, для активной локации и других целей // Труды ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 116–119.
7. Бутиков Е.И., Кондратьев А.С. Физика: Учеб. пособие: В 3 кн. Кн. 1. Механика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004 – 352 с.
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: «Наука». 1972. 720 с.
9. Васильев Н.И., Липенков В.Я., Дмитриев А.Н. и др. Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4 С. 12–20.
10. Веркулич С.Р. Последний ледниковый максимум и дегляциация в краевой зоне Антарктиды : автореф. дис. докт. географ. наук. 2011, Москва, 46 с.
11. Владов М.Л., Старовойтов М.Л. Введение в георадиолокацию. М.: МГУ, 2004. 153 с.
12. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. М.: «Советское радио», 1971 665 с.
13. Гурвич И.И. Сейсморазведка. М.: «Недра», 1975. 402 с.
14. Зотиков И.А. Антарктида. Дорога к озеру Восток. М.: Голос-Пресс, 2008. 384 с.
15. Зотиков И.А., Капица А.П., Сорохтин О.Г. Тепловой режим ледникового покрова Центральной Антарктиды // Бюллетень Советской Антарктической экспедиции. 1965. № 51. С. 27–33.
16. Иродов И.Е. Механика. Основные законы [Электронный ресурс] // И.Е. Иродов – 12-е изд. (эл.). – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 309 с.
17. Кабардин О.Ф. Физика : справочные материалы. Москва: Просвещение, 1991. 368 с.
18. Какие тайны скрывает древнее озеро Восток. Земля. Хроники жизни. URL: <https://earth-chronicles.ru/news/2017-12-18-111077> [дата обращения 31.03.2022].
19. Капица А.П. Словари и энциклопедии на академике. URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/201737> [дата обращения 01.04.2022].
20. Козлов Д.В. Основы гидрофизики. Учебное пособие. ISBN 5-89231-133-3. Москва: Московский государственный университет природообустройства. 2004. 242 с.
21. Котляков В.М. Гляциология Антарктиды. Избранные сочинения в 6 книгах. Книга 1. Москва: «Наука», 2000. 431 с.
22. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: «Наука», 1976. 255 с.

23. Кузнецов А.И. Гипотеза о современном строении и состоянии ледникового покрова Антарктиды. // Авт. свидетельство 37-Н. Научные открытия 2015 / Сб. кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез. Москва: Изд. Росс. академии естественных наук, 2016. С. 56–57.
24. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. М.: «Наука», 1986. Т. VI. 736 с.
25. Лейченко Г.Л., Беляцкий Б.В., Попков А.М., Попов С.В. Геологическая природа подледникового озера Восток в восточной Антарктиде // Материалы гляциологич. исследований. 2005. Вып. 98. С. 81–91.
26. Лейченко Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В., Иванов С.В. Строение земной коры и история геологического развития осадочных бассейнов индоокеанской акватории Антарктики. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», ФГУНПП «ПМГРЭ», 2015. 200 с. ISBN 978-5-88994-117-0.
27. Лейченко Г.Л., Попков А.М. Прогнозный осадочный разрез подледникового озера Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4. С. 21–30.
28. Лекция 5. Слайд 4: Фазовая диаграмма воды. URL: <https://slide-share.ru/lekcija-5-3946> [дата обращения 31.03.2022].
29. Липенков В.Я., Барков Н.И., Саламатин А.Н. История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного керна со станции Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2000. Вып. 72. С. 197–236.
30. Липенков В.Я., Полякова Е.В. и др. Особенности строения антарктического ледникового покрова в районе станции Восток по результатам петроструктурных исследований ледяного керна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 76. С. 68–77.
31. Липенков В.Я., Полякова Е.В., Екайкин А.А. Закономерности формирования конжеляционного льда над подледниковым озером Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4. С. 65–77
32. Лукин В.В. У порога неизведанного. Проблемы изучения подледникового озера Восток. Краткая история и перспективы. URL: <https://docplayer.com/41440600-U-poroga-neizvedannogo.html> [дата обращения 31.03.2022].
33. Марков А.Н., Котляков В.М. Особенности динамики ледникового покрова Восточной Антарктиды // Доклады Академии наук. 2006. Т. 411. № 3. С. 410–413.
34. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев В.В., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Доклады Академии наук. 2001. Т. 379. № 5. С. 680–685.
35. Переохлаждённая жидкость. Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Переохлаждённая_жидкость [дата обращения 31.03.2022].
36. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подлёдный и коренной рельеф // Лёд и Снег. 2011. № 1. С. 25–35.
37. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4. С. 31–38.
38. Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н., Лучининов В.С. Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток // Материалы гляциологич. исследований. 2001. Вып. 90. С. 206–208.
39. Презентация к уроку «Плавление и отвердевание». Инфоурок. URL: <https://infourok.ru/prezentaciya-k-uroku-plavlenie-i-otverdevanie-2981664.html> [дата обращения 31.03.2022].

40. Самолёты Второй мировой войны сейчас находятся под тысячами годовых слоёв льда. РадиоВики. URL: https://ru.rationalwiki.org/wiki/Самолёты_Второй_мировой_войны_сейчас_находятся_под_тысячами_годовых_слоёв_льда [дата обращения 01.04.2022].
41. Тайна гиганского водоема под Антарктидой: кто обитает в озере Восток? URL: <https://readweb.org/141391-tajna-russkogo-ozera-pod-antarktidoj-kto-obitaet-v-ozere-vostok.html> [дата обращения 31.03.2022].
42. Талалай П.Г. Проникновение в подледниковые озёра: планы или реальность. URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/09_06/ICE.HTM [дата обращения 31.03.2022].
43. Ускорение свободного падения. Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ускорение_свободного_падения [дата обращения 31.03.2022].
44. Шерифф Р., Гелард. Л. Сейсморазведка. Т. 1. М.: «Мир», 1987. 447 с.
45. Шерифф Р., Гелард. Л. Сейсморазведка. Т. 2. М.: «Мир», 1987. 396 с.
46. Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G. De Q. [et al.] A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // «Nature». 1996. Vol. 381. № 6584. P. 684–686.
47. Martin J. Siegert, J. Cynan Ellis-Evans, Martyn Tranter et al. Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes. // Nature. 2001. Vol. 414, P. 603–609.
48. Richter A., Popov S.V., Dietrich R. [et al.] Observational evidence on the stability of the hydroglaciological regime of subglacial Lake Vostok. // Geophysical research letters. 2008. Vol. 35, L11502, doi:10.1029/2008GL033397
49. Siegert M.J. Lakes beneath the ice sheet: The Occurrence, Analysis, and Future Exploration of Lake Vostok and Other Antarctic Subglacial Lakes // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2005. 33. P. 215–245.
50. Studinger M., Bell Robin E., Karner Garry D. [et al.] Ice cover, landscape setting, and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica. // Earth and Planetary Science Letters 6463. 2002. P. 1–16.
51. UAF model used to estimate Antarctic ice sheet melting. URL: <https://phys.org/news/2015-09-uaf-antarctic-ice-sheet.amp> [дата обращения 31.03.2022].
52. Udisti R., Becagli S., Castellano E. et al. Stratigraphic correlations between the European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) Dome C and Vostok ice cores showing the relative variations of snow accumulation over the past 45 kyr // Journal of Geophysical research. 2004. Vol. 109, D08101, doi:10.1029/2003JD004180.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Теплофизические процессы в ледниковом покрове Антарктиды	6
1.1. Определение примерной величины теплового потока в Антарктиде для дальнейшего рассмотрения	6
1.2. Температурные соотношения в ледниковом покрове в районе станции Восток.....	8
1.3. Теплофизические свойства различных слоёв льда в районе станции Восток	10
1.4. Сопоставление изменений теплофизических свойств льда в районе станции Восток в Антарктиде с накоплением его слоёв в различные исторические периоды	12
1.5. Условия, при которых может идти процесс таяния или замерзания нижней поверхности льда исходя из теплофизических процессов.....	17
1.6. Таяние льда и замерзание воды на нижней поверхности ледника и процессы, с этим связанные	18
1.6.1. Физические зависимости процессов таяния льда и замерзания воды	19
1.6.2. Тепловые зависимости при таянии и замерзании и возможный дополнительный фактор — время	20
1.6.3. Процесс донного таяния в рассматриваемых нами условиях в районе станции Восток	21
1.6.4. Как может формироваться граница между льдом и водой под ледниковым покровом	24
1.6.5. Возможность замерзания воды в рассматриваемых нами условиях и возможная связь этого процесса с наличием под ледником переохлаждённой воды	26
1.6.6. Возможные причины неравномерного подвода тепла к нижней поверхности ледника в Антарктиде	29
1.6.7. Влияние донного таяния на механические процессы в леднике	30
2. Взаимодействие льда и воды	34
2.1. Возможное положение и распространение жидкой воды, находящейся между льдом и каменным основанием.....	34
2.2. К чему приводит давление вышележащего сверху льда на жидкую воду?.....	35
2.3. Может ли современное «озеро Восток» быть реликтовым, т.е. образовавшимся до начала оледенения и просуществовавшим до настоящего времени?.....	39
2.4. Могло ли подледниковое озеро образоваться из воды, полученной при таянии льда?	43
3. Механические процессы, происходящие в леднике во внутриконтинентальных и окраинных частях Восточной Антарктиды	44
3.1. Взаимосвязь донного таяния и вертикального движения льда	44
3.2. Определение наличия и скорости вертикального движения льда на радиолокационных разрезах.....	45
3.3. Горизонтальное движение ледника	52
3.3.1. Условия возникновения горизонтального движения льда и изменения скорости его движения	54
3.3.2. Почему уменьшается скорость горизонтального движения в леднике?	57

3.3.3. Существование во льду поверхности несогласия между слоистой неподвижной нижней и подвижной верхней зонами	57
3.3.4. Как при движении нижние слои льда преодолевают встретившиеся на его пути препятствия?.....	58
3.3.5. Чем замещается смещённая в определённом направлении масса льда?	58
4. Различия в строении ледника во внутриконтинентальных и в прибрежных областях Антарктиды	61
5. Геологическое строение структуры, расположенной в районе станции Восток в Восточной Антарктиде	70
5.1. Может ли эта структура быть осадочным образованием, сформировавшимся до начала оледенения?	70
5.2. Альтернативная интерпретация радиолокационных и сейсмических данных, полученных в районе депрессии Восток	71
5.3. Альтернативная модель строения подлёдного геологического образования в районе станции Восток	84
Выводы и рекомендации (вместо заключения).....	87
Задачи исследований, направленных на уточнение строения ледника Антарктиды и подлёдных геологических образований.....	88
Задачи, которые могут быть решены при проникновении под ледник	89
Задачи палеогляциологии.....	89
Задачи, решаемые с помощью бурения ледника.....	89
Задачи, решаемые геофизическими методами.....	91
Технические средства для решения поставленных задач	92
Интерпретация геофизических данных.....	93
Задачи, связанные с интерпретацией радиолокационных данных	93
<i>Приложение 1</i>	95
Краткая история открытия и изучения озера Восток	95
Современные представления об озере Восток, общепринятая гипотетическая модель, построенная на основе различных исследований.....	96
Насколько реально наличие осадочного бассейна под ледником в районе расположения станции Восток?.....	100
<i>Приложение 2</i>	101
Радиолокационные исследования	101
Кратко о методике проведения радиолокационных исследований	101
Особенности радиолокационных записей	102
Кратко о физических основах радиолокации ледников	104
Причины искажений положения нижней контрастной границы на радиолокационных разрезах.....	110
<i>Приложение 3</i>	113
Сейсмические исследования.....	113
Коротко о физических основах сейсмических методов разведки	114
Методика моделирования и использованные формулы.....	116
Список литературы	119
Оглавление.....	122

