

ного поля.

Молодой, мезозойско-кайнозойский тектонический план, частично наследуя предшествующие дислокации, проявляется в магнитном поле и подледном рельефе линеаментами восток-северо-восточного субширотного и северо-западного направлений. Последние для него наиболее характерны и, вероятно, связаны с вертикальными мезозойско-кайнозойскими движениями. Вертикальные перемещения амплитудой в первые сотни метров предлагаются в линейных впадинах глубиной от 100 до 600 м и площадных поднятиях высотой более 150 м с линейными градиентными границами (рис. 6) протяженностью до 100 км, которые несогласно наложены на древний структурный план, консолидированный к началу мезозойско-кайнозойского этапа развития.

Повсеместно отмечаются тектонические нарушения различных направлений, выраженные узкими, глубоко врезаемыми долинами протяженностью более 100–150 км, секущие докембрийские образования региона.

Магматическая активность этого периода проявляется по характерным магнитным аномалиям, картирующим интрузии различных форм и размеров. Например, зона тектонической активизации (рис. 7) завершающих стадий развития проявляется узкими линейными положительными магнитными аномалиями амплиту-

УДК 550.8.05:[550.83:550.814+621.396.96](99.923.1/2)

© Кузнецов А.И., Сергеев М.Б., 2012

Кузнецов А.И., Сергеев М.Б. (ФГУНПП «ПМГРЭ»)

ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЭРОРАДИОЛОКАЦИИ ЛЕДОВОЙ ТОЛЩИ НА ЗЕМЛЕ ПРИНЦЕССЫ ЕЛИЗАВЕТЫ В ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЕ

В статье приводятся первые результаты применения современных программных средств для обработки полевых записей аэрорадиолокационных исследований, проводимых в последние годы ФГУНПП «ПМГРЭ» в прибрежных районах Восточной Антарктиды, после преобразования их в международный формат SEG-Y. Это позволило осуществить более тщательный анализ строения ледникового покрова и более уверенно выявить его неоднородности по вертикали и горизонтали. По различию в строении выделены три зоны (I, II и III) по вертикали и три области (А, В и С) по горизонтали. Даются пояснения, как на формирование такой структуры ледника повлияли протекающие здесь физические процессы — донное таяние и

смещение поверхности ледникового покрова, а также история оледенения. Приводится новая модель строения ледникового покрова в прибрежной зоне Антарктиды. **Ключевые слова:** аэрорадиолокация ледовой толщи, вертикальное и горизонтальное строение ледника, движение льда и донное таяние, программы обработки, формат SEG-Y.

*The first results of processing of the RES-data obtained by the Polar Marine Geological Research Expedition in the coastal areas of East Antarctica after their transformation to format SEG-Y are presented. It has allowed to consider more in detail the structure of ice sheet and determined its structural heterogeneity as a vertical, and a horizontal one. There are three zones in vertical structure of the ice sheet (I, II and III) and three areas in horizontal structure (A, B and C). Explanation of such a structure of the ice-sheet is connected with specific physical processes and history of glaciations. The new model of the structure of the ice sheet in the coastal areas of Antarctica is presented. **Key words:** Airborne radar sounding of the ice sheets, vertical and horizontal structure of the Antarctic ice sheet, ice movement and bed ice melting, processing programs, format SEG-Y.*

Преобразование полевых записей аэрорадиолокационных исследований, проводимых в последние годы ФГУНПП «ПМГРЭ» в прибрежных районах Восточной Антарктиды в комплексе с аэромагнитной съемкой, в международный формат SEG-Y позволило применить при их камеральной обработке современные программные средства, используемые при сейсмических исследованиях. Применение сейсмических программных комплексов наряду с выполнением основных их назначения — анализа данных, построения карт подледного рельефа и мощности ледникового покрова позволило более контрастно выделить замечавшиеся здесь и ранее неоднородности строения ледникового покрова.

Выяснилось, что ледниковый покров исследуемой территории обладает рядом характерных особенностей как по вертикали, так и по горизонтали. Анализ причин, вызвавших такое своеобразное строение ледникового покрова, выявил влияние на его формирование двух физических процессов — теплового, проявляющегося в виде донного таяния, и механического, смещающего верхний слой ледника в сторону побережья. Все это позволило авторам сделать выводы об особенностях горизонтального и вертикального движения ледникового покрова, и на этой основе пересмотреть ряд представлений о строении ледника, принятых в настоящее время.

Результаты обработки аэрорадиолокационных данных

В настоящее время в антарктической геофизической партии ФГУНПП «ПМГРЭ» камеральная обработка геофизических данных, получаемых в Антарктиде, производится на достаточно современном уровне с использованием широкого комплекса программных средств и обрабатывающих комплексов. Однако, для некоторых видов исследований на начальном этапе обработки использование стандартных программ невозможно ввиду их специфического формата полевых записей. В первую очередь, это касается аэрорадиолокационных и наземных радиолокационных исследований. По своей специфике они близки к сейсмическим исследова-

ниям, т.к. при проведении полевых работ формируется временной разрез, на котором каждой точке наблюдений соответствует временная трасса, а набор трасс формирует профиль или маршрут. Поэтому вполне резонным было бы использование для обработки таких данных программных комплексов, применяющихся в сейсморазведке после преобразования полевых записей в широко распространенный в настоящее время международный формат SEG-Y. Для этой цели одним из авторов (А.И. Кузнецов) была написана программа переформатирования данных аэрорадиолокации из так называемого полевого формата NAL в формат SEG-Y.

Основной задачей аэрорадиолокационных исследований, проводимых ФГУНПП «ПМГРЭ» в прибрежных районах Восточной Антарктиды в комплексе с аэромагнитной съемкой, является построение карт подледного рельефа и мощности ледникового покрова. После преобразования полевых данных в формат SEG-Y стало возможным применение для этих целей стандартных сейсмических программ, основной из которых является SeisVision и которая входит в комплекс обработки сейсмических данных GeoGraphix Discovery. Она позволяет коррелировать выявленные границы на взаимно пересекающихся радиолокационных маршрутах (рис. 1) и строить карты выделяемых поверхностей на всю площадь исследований в одной из выбранных географических проекций. Плотная сеть наблюдений и значительное количество взаимных пересечений маршрутов на изучаемой площади позволяют тщательно контролировать по ним качество и точность выполняемых построений. Полученные в ходе обработки программой SeisVision карты поверхностей (во временах) могут быть переданы в ГИС для дальнейших расчетов и построения окончательных карт (в глубинах). Второй программой, которая может быть применена для обработки данных аэрорадиолокации, является программа SeiSee. С ее помощью можно визуализировать записи в различных масштабах по горизонтали и вертикали, менять усиление сигнала, производить фильтрацию и автоматическую регулировку усиления (рис. 2).

Первое же применение этих программ показало, что помимо основных задач с их помощью можно проделать более тщательный по сравнению с ранее проводившимся анализ строения ледникового покрова. С этой целью авторами при использовании вышеназванных программ была произведена обработка полевых данных 51 и 55 Российской Антарктической Экспедиции (РАЭ), выполненных на Земле Принцессы Елизаветы, после преобразования их в формат SEG-Y (рис. 3).

В ходе анализа было выяснено, что в районах удаленных от побережья, выделяемых нами в дальнейшем как область А, по характерным признакам можно выделить по вертикали три зоны — верхнюю, среднюю (главную) и нижнюю (рис. 1). Каждая из них характеризуется следующими особенностями.

Верхняя, неширокая зона (зона I на рис. 1) отличается от нижележащей практически полным отсутствием хорошо выраженной слоистости. На радиолокационных разрезах эта зона выглядит однородной с многочисленными хаотическими отражениями. Мощность этой зоны на радиолокационных разрезах составляет

2–3 мкс. Если принять скорость распространения электромагнитных волн в этом слое ледника около 200 м/мкс, то мощность зоны I можно оценить в 200–300 м. В ледниковом покрове в него входит верхний слой свежевыпавшего снега, фирна и слой сформировавшегося молодого льда.

Средняя (главная) зона характеризуется наличием хорошо выраженных протяженных горизонтальных и наклонных слоев, которые большинством исследователей считаются изохронными поверхностями (зона II на рис. 1). Она отделяется от вышележащей зоны I несо-

гласием в виде своеобразного срезания слоистости в нижней зоне на границе с верхней.

Нижняя однородная зона расположена под слоистой толщей и характеризуется практически полным отсутствием слоистости (зона III на рис. 1). Физическая природа этого слоя в ледниковом покрове пока однозначно не определена. В иностранных публикациях он называется «radio-echo free zone in ice sheets» (EFZ). Такая зона (или слой) наблюдается под внутриконтинентальным ледниковым покровом практически повсеместно, начиная с некоторого удаления от побережья. На име-

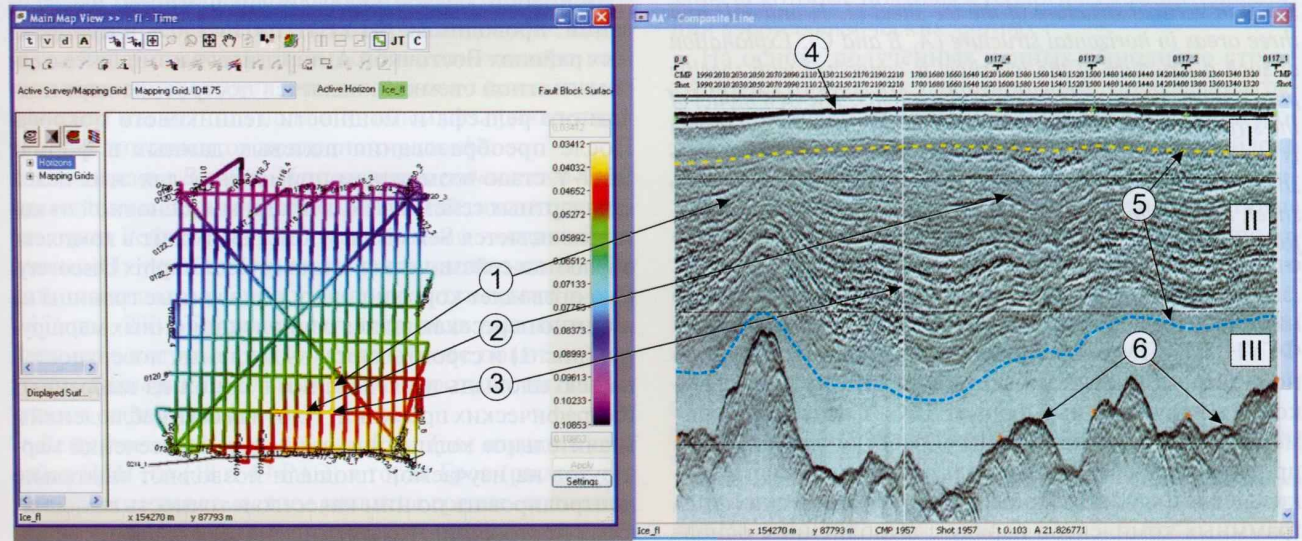


Рис. 1. Использование для обработки данных аэрорадиолокации программы SeisVision и выделенные границы между различными зонами ледникового покрова: 1 — фрагмент маршрута 51_118_1, 2 — фрагмент маршрута 51_120_5, 3 — место взаимного пересечения этих маршрутов, 4 — дневная поверхность, 5 — границы между зонами, 6 — подстилающее каменное основание; зоны в ледниковом покрове: I — верхняя, II — средняя (главная), III — нижняя

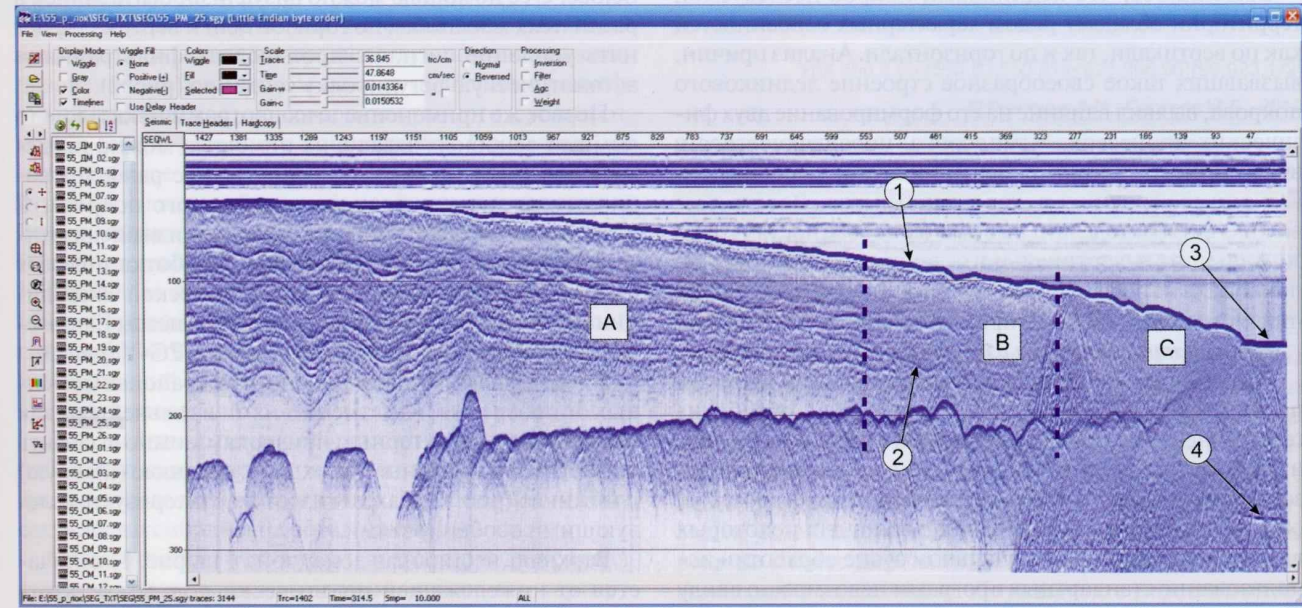


Рис. 2. Использование программы SeisSee для анализа данных аэрорадиолокации и выделения особенностей горизонтального строения ледникового покрова (фрагмент маршрута 55_fm_25, положение маршрута 55_fm_25 показано на рис. 3): отражение: 1 — от поверхности ледникового покрова, 2 — кратное от дневной поверхности, 3 — от открытой водной поверхности, 4 — кратное от открытой водной поверхности; A, B и C — области с различным вертикальным строением ледника

ющихся радиолокационных записях она проявляется в виде очень низких (практически фоновых) значений амплитуды зарегистрированных электромагнитных волн.

Нами отмечается, что в пределах рассматриваемого района изохронные поверхности в среднем слое и граница среднего и нижнего слоев на всех маршрутах примерно повторяют рельеф подстилающего каменного основания. Необходимо отметить, что такое трехслойное строение ледникового покрова характерно для всей внутриконтинентальной Антарктиды за исключением участков над одиночными подледниковыми вершинами, где может отсутствовать нижний однородный слой.

Применение программы SeiSee позволило более наглядно показать, что в прибрежных и непосредственно примыкающих к побережью областях ледниковый покров имеет иное строение, нежели во внутриконтинентальных областях. По мере приближения к побережью на удалении от берега около 30–40 км в средней зоне ледникового покрова (зоне II) наблюдается постепенное пропадание слоистости. Практически повсеместно это происходит там, где одновременно полностью или почти полностью исчезает нижняя однородная зона.

На некотором протяжении наиболее хорошо выраженные изохронные поверхности внутри ледника еще наблюдаются, но потом пропадают. И они, и ледниковый покров становятся практически однородными по всей мощности от поверхности до основания с многочисленными хаотическими отражениями. Область перехода от «нормального» трехслойного ледника (область А) к практически однородному (прибрежному) леднику выделяется нами как область В (рис. 2).

При дальнейшем приближении к побережью на удалении в среднем 10–20 км от берега практически на всех радиолокационных маршрутах в леднике в средней зоне, как только что было сказано, уже полностью перестают проследиваться протяженные границы. Здесь вплоть до чистой воды можно проследить совершенно однородный ледник относительно небольшой мощности, выделяемый нами как область С (рис. 2). Примечательно, что начало области С совпадает с прибрежной полосой развития трещин во льду.

Выявленные изменения строения ледникового покрова наблюдаются на всех аэро-радиолокационных маршрутах, направленных в сторону побережья. Это позволило проследить их от маршрута к маршруту и нанести на карту границы областей А, В и С (рис. 3).

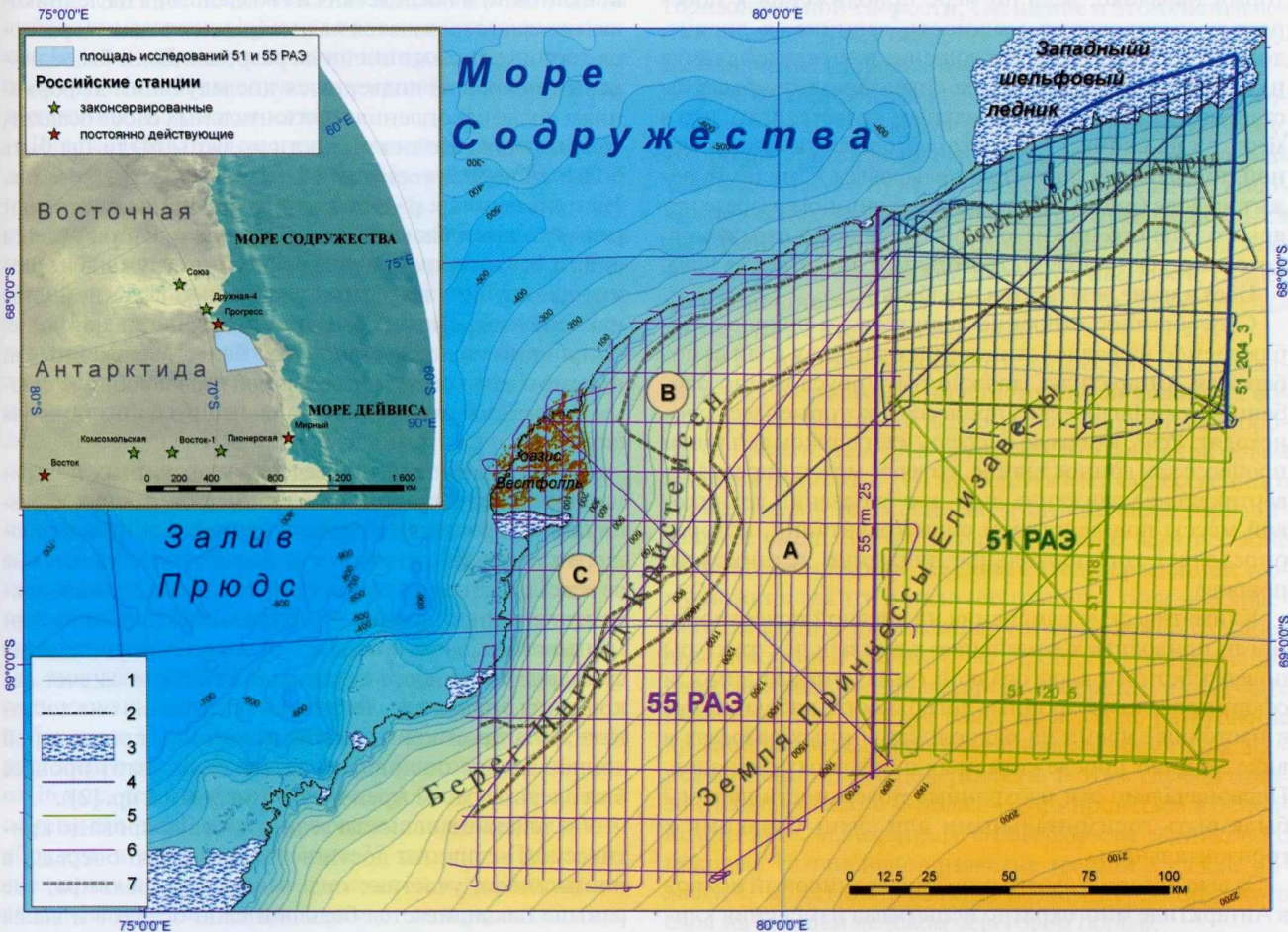


Рис. 3. Схема маршрутов аэро-радиолокационных исследований 51 и 55 РАЭ и области, различающиеся по строению ледникового покрова: 1 — изолинии глубин моря и высот дневной поверхности, 2 — береговая линия, 3 — шельфовые и выводные ледники, 4 — маршруты 51 РАЭ (северная часть), 5 — маршруты 51 РАЭ (южная часть), 6 — маршруты 55 РАЭ, 7 — границы областей А, В и С, различающихся по строению ледникового покрова. Жирными линиями выделены маршруты, фрагменты которых представлены в статье

Следует еще раз подчеркнуть, что однородности нижнего слоя (зона III) в области А, о которой говорилось ранее, и однородность ледника в области С имеют совершенно различную природу. В зоне III области А практически нет никаких отражений вообще, тогда как в области С отражений много, но они имеют хаотичный совершенно нерегулярный характер.

При применении для визуализации полевых аэро-радиолокационных записей программы SeiSee мы отметили еще одну закономерность, которая наблюдается на радиолокационных данных в прибрежной зоне Антарктиды, а именно — изменение интенсивности отраженного от каменного основания сигнала в зависимости от мощности ледника и его строения. В областях А и В интенсивность отражения от каменного основания зависит в основном от мощности ледникового покрова. Это легко объясняется закономерным ослаблением отраженного электромагнитного сигнала по мере увеличения мощности ледника (рис. 2). В начале области С интенсивность отраженного сигнала от каменного основания остается достаточно высокой, и он прослеживается здесь достаточно уверенно, даже несмотря на наличие дифракций. Далее по мере приближения к побережью интенсивность отраженного сигнала уменьшается, иногда довольно резко. В этом заключается некоторый парадокс, ведь по мере приближения к побережью уменьшается мощность ледника, а значит, должно уменьшиться и поглощение волн в теле ледника и, следовательно, амплитуда сигнала должна была бы становиться выше. Удивительным является и то, что в местах, где ледник, судя по его субгоризонтальной дневной поверхности, является шельфовым и, видимо, лежит на воде (рис. 3). На радиолокационном разрезе нет яркого ровного нижнего горизонтального отражения, которое должно присутствовать на границе лед — вода.

Обсуждение результатов обработки

Своеобразное строение ледникового покрова, наблюдаемое на радиолокационных разрезах вблизи побережья Антарктиды, должно быть обусловлено особенностями физических процессов, которые здесь происходят. Речь, в первую очередь, идет о таком тепловом процессе как донное таяние, которое может определять вертикальное движение льда, и о сползании ледниковой массы под действием силы гравитации, которая определяет горизонтальное движение ледникового покрова.

Климатические изменения на дневной поверхности могли приводить к изменению состава или структуры поверхностного слоя осадков (льда), что, видимо, и сформировало изохронные поверхности, наблюдаемые в настоящее время на радиолокационных разрезах в виде хорошо прослеживаемых синфазных сигналов. Первоначально эти изохронные поверхности должны были быть горизонтальными или очень близкими к горизонтальным.

За всю историю своего развития ледниковый покров в Антарктиде многократно испытывал изменения климатических условий, и считается, что в периоды похолоданий он имел более обширное распространение. В такие периоды береговая черта могла находиться на существенно большем удалении от рассматриваемого

района, чем в настоящее время, а ледник здесь мог иметь большую мощность. Наступавшие вслед за похолоданиями эпохи относительных потеплений могли и должны были вызвать два процесса, оказывавших влияние на дальнейшую историю развития ледникового покрова — это относительный нагрев его верхнего слоя и изменение положения береговой линии. Последствия относительного нагрева верхнего слоя ледникового покрова проявляются в том, что в настоящее время наблюдается такое распределение изотерм, при котором от поверхности с глубиной температура сначала понижается, затем начинает постепенно повышаться. При этом это наблюдается и в прибрежных, и в континентальных областях Антарктиды [4].

Результатом потепления было разрушение краевой части ледникового покрова, при этом береговая черта постепенно приближалась к данному району. При разрушении краевой части ледника, как и в настоящее время при образовании айсбергов, образовывались уступы значительной высоты, к подножью которых начал смещаться лед с дневной поверхности. Это, скорее всего, и служило причиной ускорения горизонтального движения льда.

Попробуем найти, как два вышеназванных процесса (донное таяние и продвижение береговой черты внутрь континента) и последствия их воздействия на ледниковый покров отражаются на имеющихся в нашем распоряжении радиолокационных разрезах. Если бы ледниковый покров не подвергался последующим деформациям после накопления горизонтальных слоев осадков, то и изохронные поверхности должны были бы быть большей частью горизонтальными. Однако это не так. На приведенных разрезах они в основном повторяют рельеф подстилающего каменного основания, причем одна и та же изохронная поверхность погружена на различную глубину на разных участках. С глубиной углы наклона изохронных поверхностей увеличиваются, т.е. с глубиной складки становятся более выраженными, при этом сами структуры сохраняют свою общую форму внизу и вверху средней зоны ледникового покрова (зоны II).

Объяснением такого поведения изохронных поверхностей может быть донное таяние, протекающее с различной скоростью на различных участках подстилающего каменного основания и вызывающее различные вертикальные смещения слоев льда. Условия для возникновения донного таяния обусловлены наличием геотермального теплового потока и тем, что по мере увеличения суммарной мощности ледникового покрова за счет накопления осадочных слоев в ходе оледенения она достигала некоторой критической величины, при которой донное таяние становилось возможным (этот процесс был впервые рассмотрен И.А. Зотиковым и др. [2]).

Увеличение мощности ледникового покрова до критической величины достигается, в первую очередь, в пониженных участках подстилающего рельефа, где раньше накапливается большой слой осадков и выше температура основания, здесь донное таяние и возникает в первую очередь. За счет этого ледниковый покров в таких местах начнет опускаться относительно соседних участков, где таяния пока нет. Это должно отра-

зяться в различии мощности слоя осадков над зоной опускания и в соседних областях, т.к. в пониженный участок будут перемещаться осадки с соседних возвышенных областей. Позже донное таяние может начаться и в других, более возвышенных областях, и в них также может происходить опускание дневной поверхности и неравномерное накопление слоя осадков. Этим как раз и можно объяснить различную глубину погружения изохронных поверхностей. Вполне возможно, что в данном районе над отдельными локальными подледными возвышенностями донного таяния не было вообще. В окружающих такие возвышенности пониженных участках подледного рельефа за счет опускания нижнего вытаявшего слоя за тот же период времени накапливалось больше осадков, чем над возвышенностями коренного рельефа.

Такой подход позволяет по разнице в мощности слоев льда между разновозрастными изохронными поверхностями на разных участках радиолокационного разреза оценить скорость донного таяния (v), которая может быть определена по формуле:

$$v = \frac{h_m - h_0}{t},$$

где $h_m - h_0$ — разность между мощностью слоя льда на выбранном участке (h_m) и над подледной возвышенностью (h_0); t — период, в течение которого накапливался слой льда (в нашем случае, временной отрезок между изохронными поверхностями).

Для расчетов по вышеприведенной формуле мы воспользовались программой SeiSee. На маршруте 51_120_5 нами было выделено пять точек (1–5), где видимое погружение слоев различно. На них по наблюдаемому времени двойного пробега радиолокационных волн нами были определены мощности промежуточных слоев в зоне II между двумя протяженными изохронными поверхностями. Мы считали скорости опускания промежуточных слоев (изохронных поверхностей), а значит, и донного таяния относительно участка 5, где над подледной возвышенностью оно, видимо, отсутствует. При расчетах определенная сложность возникла в определении временного интервала, в течение которого происходило накопление осадков и который необходим для определения скорости. В данном районе специальных исследований по определению возраста льда на различной глубине не проводилось. Для приближенных расчетов мы могли воспользоваться только данными, полученными С.В. Поповым при интерпретации радиолокационных наблюдений от станции Восток к побережью [3]. В соответствии с этими данными, возраст льда в рассматриваемом районе может составлять от 26 тыс. лет в верхней части зоны II до 103 тыс. лет в основании этой зоны, которая накапливалась, таким образом, в течение примерно 77 тыс. лет. При таких значениях возраста льда временной интервал между выделенными нами изохронными поверхностями мы оценили в 23,5 тыс. лет. При принятии этого условия после проведения необходимых расчетов нами были получены приведенные в таблице значения скорости донного таяния для пяти выбранных точек.

Расчетные значения скорости донного таяния в контрольных точках 1-5 на маршруте 51_120_5 для временного интервала 23,5 тыс. лет, мм/год

№ расчетной точки	Скорость донного таяния
1	10,47
2	1,16
3	4,63
4	2,29
5	0

Как и следовало ожидать, в пониженных участках рельефа скорость донного таяния выше. При возникновении условий для стока талой воды из места таяния, этот процесс может идти непрерывно. Донным таянием можно объяснить и отсутствие древнего льда в основании ледникового покрова.

Рассмотрим теперь вопрос о горизонтальном движении ледника. По имеющимся в настоящее время данным о скорости горизонтального движения ледникового покрова в рассматриваемом районе, ее величина может составлять здесь до 100 м/год [1]. Движение направлено в сторону побережья. Если принять время накопления льда в зоне II равным 77 тыс. лет, о чем было сказано ранее, то за это время при такой величине горизонтальной скорости, смещение в этом направлении в прибрежных областях может иметь очень большое значение (порядка 7–8 тыс. км).

Если бы горизонтальное движение ледника происходило не только в его верхней зоне, но и по всему объему, то при набегании ледового потока на препятствие, находящееся на его пути, например, на отдельные высокие поднятия, неизбежно должно было бы наблюдаться увеличение мощности слоев льда со стороны набега. С противоположной стороны, наоборот, скорее всего, мощность слоев льда должна была бы уменьшиться относительно исходной.

На имеющихся в нашем распоряжении радиолокационных разрезах нет ни одного случая подобных соотношений мощности ледовых слоев по разные стороны от препятствия. Это указывает, что основной объем ледника (зоны II и III) не испытывает существенного горизонтального смещения, а интенсивное горизонтальное смещение испытывает только верхняя зона ледникового покрова, т.е. зона I. Подтверждением этому может служить и наличие границы типа несогласного залегания нижележащих и вышележащих слоев льда между I и II зонами (рис. 1). Видимое направление движения льда в зоне I в сторону побережья может быть объяснено тем, что там ранее произошло разрушение краевой части ледника, и в настоящее время туда происходит снос льда с поверхности. В этом случае, горизонтальная область С должна формироваться в основном из льда, вынесенного с поверхности ледникового покрова. Интенсивное развитие трещин в начале области С может быть связано резким перегибом этого слоя на бывшем ледовом береговом обрыве.

Итак, по результатам анализа выявленных особенностей строения ледникового покрова вблизи побережья Антарктиды мы смогли сделать следующие выводы.

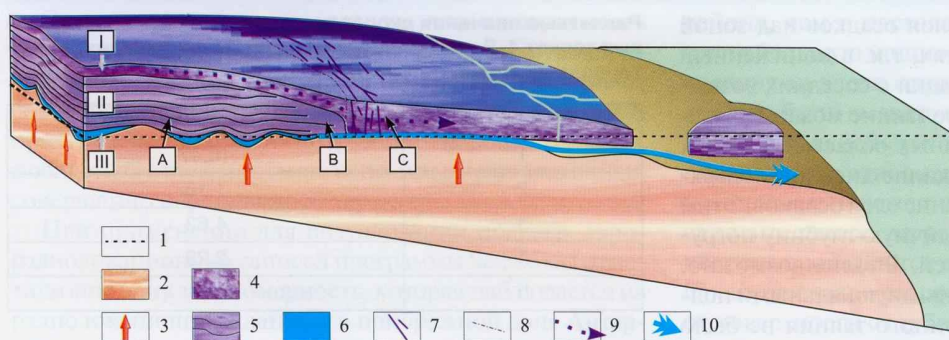


Рис. 4. Предлагаемая модель строения ледникового покрова вблизи побережья Антарктиды: 1 — уровень моря, 2 — каменное основание, 3 — геотермальный тепловой поток, 4 — верхняя зона (зона I) ледникового покрова, прибрежный ледник, выводные и шельфовые ледники, айсберги, 5 — средняя (главная) зона (зона II) ледникового покрова, 6 — нижняя зона (зона III) ледникового покрова, 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. I, II и III — зоны в ледниковом покрове; A, B и C — области с различным вертикальным строением ледника

В строении ледникового покрова в его изученной в 51 и 55 РАЭ части выделяются три зоны по вертикали (I, II и III) и три области по горизонтали (A, B и C).

Зона I является верхней частью ледникового покрова, движущейся в горизонтальном направлении в сторону побережья.

Поведение изохронных поверхностей в зоне II говорит об отсутствии горизонтального смещения и о наличии вертикального движения льда, различающегося в зависимости от скорости донного таяния на различных участках.

Физическая природа зоны III остается неясной, но следует отметить, что донное таяние, по-видимому, происходит только там, где присутствует эта зона.

Горизонтальная область A является «нормальной» трехслойным ледником, сформировавшимся в ходе оледенения, испытывающим воздействие донного таяния и интенсивно движущимся в горизонтальном направлении только в своей верхней части.

Горизонтальная область B является частью трехслойного ледника, которая в недавнем времени была его краевой частью. Пропадание в ней изохронных поверхностей связано, по всей вероятности, с происходившими здесь деформациями и связанными с этим изменениями структуры льда.

Горизонтальная область C является областью распространения льда, сместившегося с поверхности внутриконтинентального ледникового покрова, т.е. представляет собой лед зоны I, переместившийся сюда из области A.

Такие выводы позволяют составить модель строения ледникового покрова вблизи побережья (рис. 4). Эта модель дает представление о таких особенностях его строения, как: движение верхней части ледникового покрова и связанные с этим изменения структуры льда в районах, непосредственно примыкающих к окраинным морям; неподвижность основной слоистой массы ледника; наличие донного таяния и сток талой воды в океан.

Выводы

Применение современных программных средств для обработки данных аэрорадиолокации, полученных в

прибрежных районах Восточной Антарктиды, после преобразования их в международный стандартный формат SEG-Y позволил провести более тщательный анализ строения ледникового покрова и сделать выводы о том, что он здесь имеет различное строение его верхней, средней и нижней частей. Выделяемая нами зона I состоит из снега, фирна и верхних самых молодых слоев льда. Вся эта зона в целом смещается в горизонтальном направлении по нижележащей зоне, выделяемой нами как зона II. Средняя зона II не испытывает движения в

горизонтальном направлении (во всяком случае, существенного, следы которого были бы заметны на радиолокационных разрезах), но испытывает заметные движения в вертикальном направлении, происходящие в результате донного таяния. По характеру поведения изохронных поверхностей в средней зоне ледникового покрова можно определить наличие и приблизительно оценить скорость этого процесса. Природа нижней однородной зоны остается дискуссионной, но очевидна ее связь с донным таянием.

Уточнить многие высказываемые здесь предположения позволит более детальное изучение строения ледникового покрова в прибрежной части Антарктиды. В первую очередь, необходим тщательный анализ всех имеющихся на сегодняшний день радиолокационных данных, полученных в этих районах. Помимо этого, полезным будет мониторинг горизонтальных и вертикальных смещений ледникового покрова. Важным будет и проведение специализированных полевых работ дистанционными и прямыми методами исследований. Можно рекомендовать проведение следующего комплекса работ:

1. Более высокочастотные радиолокационные аэро- и наземные наблюдения с высокой разрешающей способностью, направленные на более детальное изучение строения и динамики развития верхней части ледникового покрова и связанных с этим процессов.

2. Проведение радиолокационных исследований на шельфовых ледниках, где определенно существует граница лед — вода, что позволит уточнить методику ее выделения, определение положения и формы.

3. Проведение специализированных сейсмических наблюдений, направленных на изучение физических свойств нижнего однородного слоя.

4. Бурение льда в прибрежных районах в области развития трехслойного ледника (область A), которое позволит напрямую определить состав, свойства и возраст льда, а также пролить свет на возможную природу нижнего однородного слоя.

Незначительное удаление прибрежных районов от научных станций и небольшая мощность льда в этих

районах облегчит проведение подобных исследований, которые не потребуют значительных затрат по сравнению с аналогичными работами, проводимыми во внутриконтинентальных областях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Атлас океанов. Антарктика.* — СПб.: Изд-во ГУНиО МО РФ, Гос. Научный центр РФ, АНИИ, 2005. — С. 185.
2. *Зотиков И.А., Капица А.П., Сорохтин О.Г.* Тепловой режим ледникового покрова Центральной Антарктиды // Бюллетень Советской Антарктической экспедиции № 51. — 1965. — С. 27–33.
3. *Ильин В.Ф.* Отчет по объекту «Геолого-геофизическое изучение и оценка минерально-сырьевого потенциала недр Антарктиды и ее окраинных морей (море Дейвиса, горные районы Земли Мак-Робертсона) в составе 54 РАЭ» / Фонды ФГУНПП «ПМГРЭ». — Кн. 2. — СПб.: Ломоносов, 2010. — С. 266.
4. *Шумский П.А.* Динамика краевой части Антарктического ледникового покрова на радиальном профиле Мирный — 100 км // Антарктика. — Вып. 20. — 1981. — С. 93–105.

В центральной и северной частях гор Принс-Чарльз выделяется 20 стратиграфически и генетически различающихся подразделений, начиная с нижнего подотдела миоцена и заканчивая современными отложениями квартера, включающими ледниковые, ледниково-морские, озерно-ледниковые, коллювиальные и отложения криогенного элювия. В других регионах Антарктиды ледниково-морские отложения известны в восточной части Земли Королевы Мод и в северной части Земли Виктории (рис. 1).

История развития региона северной части гор Принс-Чарльз в кайнозое на основе многочисленных работ, проведенных как российскими, так и иностранными исследователями, представляется чередованием как минимум трех регрессивно-трансгрессивных циклов, непосредственно связанных с изостатическими и неотектоническими флуктуациями и периодами оледе-