

Особенности строения ледникового покрова в районе исследований

Представление об особенностях строения ледникового покрова в районе проведения комплексных аэрогеофизических исследований масштаба 1 : 500 000 в 57 РАЭ может дать анализ временных радиолокационных разрезов, полученных в ходе этих работ. Как на исходных полевых записях, так и при визуализации этих записей после преобразования в формат SEG-Y_RES (см. приложение 13), весь ледниковый покров здесь можно разделить по вертикали на три условных зоны, хорошо различимых на радиолокационных разрезах (Рис. 1).

1. Верхняя, неширокая зона на всех маршрутах отличается от нижележащей слабо выраженной слоистостью или практически полным её отсутствием (см. зона I на Рис. 1). Мощность этой зоны на радиолокационных разрезах составляет 2–3 мкс. На радиолокационных записях для неё характерна высокая амплитуда сигнала близкая к амплитудным ограничениям регистрирующей аппаратуры;
2. Средняя (главная) зона на радиолокационных маршрутах характеризуется наличием хорошо выраженных протяжённых горизонтальных и наклонных слоёв (зона II на Рис. 1). Границами между слоями являются так называемые изохронные поверхности, которые формируются на радиолокационных записях кратковременным снижением амплитуды регистрируемых электромагнитных волн. Эта зона отделяется от вышележащей зоны I границей несогласия в виде своеобразного срезания слоистости в средней зоне на границе с верхней;
3. Нижняя однородная зона расположена под слоистой толщей и характеризуется сначала частичным исчезновением, а с увеличением глубины от дневной поверхности практически полным отсутствием слоистости (зона III на Рис. 1). Отсутствует чёткая граница между этой зоной и вышележащей слоистой. На радиолокационных записях эта зона характеризуется очень низкими (практически фоновыми) значениями амплитуды зарегистрированных электромагнитных волн.

Такое же хорошо выраженное трёхслойное строение ледникового покрова наблюдалось и ранее при проведении радиолокационных исследований во внутриконтинентальных областях Антарктиды при удалении от побережья на 80–100 км.

Причину формирования такого своеобразного строения ледникового покрова Антарктиды можно понять, если рассматривать ледниковый покров как геологическую структуру, сформировавшуюся в виде огромного осадочного бассейна последовательным послойным накоплением осадочного материала, в качестве которого здесь выступает снег и твёрдые частицы из атмосферы, и последующим воздействием на эти слои тектонических процессов. По мере увеличения мощности поверхностных осадков в виде снега, они под воздействием сил гравитации подвергались изменениям, превращаясь сначала в фирн, затем в лёд. Такие изменения в геологии называются метаморфизмом, когда под воздействием температур, давления и других факторов происходят изменения в структуре горной породы в условиях, отличающихся от их первоначального образования. К ледниковому покрову в Антарктиде можно применить и понятие тектоники, т.е. строение какого-либо участка земной коры, определяющееся совокупностью тектонических нарушений и историей их развития. В качестве тектонических процессов здесь можно рассматривать воздействие на первоначально накопленные слои льда физических процессов, происходящих на поверхности и в глубинных слоях ледника и вызывающие какие-то изменения их первоначального положения.

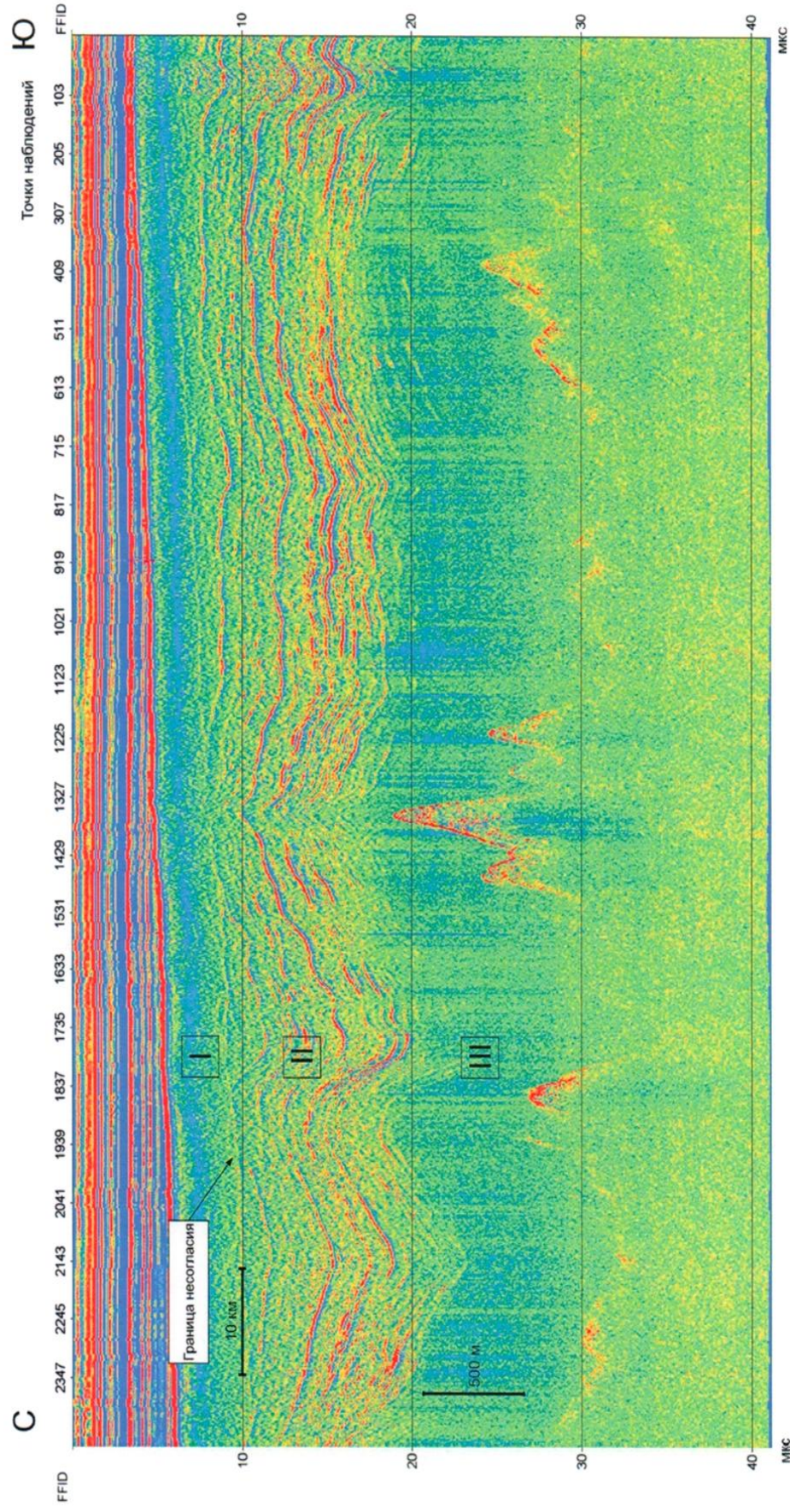


Рис. 1. Особенности строения ледникового покрова в районе исследований
Маршрут 57006 (р06 на Рис 7.1). I, II, III – зоны в ледниковом покрове. Вертикальный масштаб в метрах дан для скорости распространения электромагнитных волн во льду 168 м/мкс.

В геологии считается, что первоначальная форма залегания осадков, как правило, горизонтальная. В дальнейшем она может измениться под воздействием сил, действующих в горизонтальном или вертикальном направлении, что может привести к образованию складок, либо разрывных нарушений в слоях. При внешних воздействиях на отдельные слои в результате их изгибания образуются складчатые (пликативные) нарушения залегания. При этом образуются прогибы и выгибы самых различных масштабов, форм и происхождения: от относительно простых в структурном отношении пологих впадин и выступов до очень сложных складок, сопровождающихся искажением первичных форм залегания и послойным перемещением вещества.

Характер накопления осадков, формирование слоёв и дальнейшие изменения их формы определяется в первую очередь физическими свойствами вещества, из которого сложено образование. По характеру физических свойств, в частности плотности, некоторые исследователи (Д.И. Мушкетов) сравнивали фирн с песком, фирновый лёд с конгломератом, а ледниковый лёд – с зернисто-кристаллическим агрегатом [Серпухов В.И. и др., 1976]. Такие сравнения позволяют оценить степень их подвижности. Опираясь на подход к ледниковому покрову как к геологическому образованию и на эти сравнения, можно рассмотреть как физические процессы, проходящие в различных частях ледника, могут изменить свойства и первоначальное положение накопленных слоёв льда.

Если рассмотреть отдельно каждую выделяемую зону в ледниковом покрове, то можно сделать несколько предположений о процессах, которые в них происходят и которые привели к наблюдаемым на радиолокационных разрезах особенностям. К сожалению, довольно трудно определить мощность каждой из этих зон отдельно, т.к. все приводимые в публикациях данные по скорости распространения электромагнитных волн усредняются для всего ледникового покрова. Чаще всего принимаются значения от 168 м/мкс до 170 м/мкс, хотя измеренные методом наклонного зондирования осреднённые значения скорости распространения электромагнитных волн в Антарктиде при мощности ледника более 1000 м составляют 170,9–172,8 м/мкс [Богородский В.В. и др., 1983]. Разделение ледникового покрова на зоны и специальных исследований выделяемых зон до настоящего времени не проводилось.

Как уже говорилось ранее, зона I на радиолокационных записях прослеживается на первых 2–3 микросекундах после отражения от дневной поверхности. В ледниковом покрове в него входит верхний слой свежеснежного снега, фирна и слой сформировавшегося молодого льда. Если принять скорость распространения электромагнитных волн в этом слое выше усреднённой для всего ледника за счёт наличия в снеге, фирне и молодом льде значительного количества воздуха, т.е. около 200 м/мкс, то мощность зоны I можно оценить в 200–300 м.

В самой верхней части ледникового покрова (зоне I) отсутствие хорошо выраженной слоистости и возникновение поверхности несогласия можно объяснить разрушением слоёв льда при горизонтальном движении снега фирна и льда, наблюдаемого на поверхности Антарктиды. Для данного района направление этого движения северо-западное. Скорость движения верхнего слоя изменяется от 15 м/год на юго-востоке района работ до 40 м/год на северо-западе [Атлас океанов, 2005]. Это хорошо согласуется с рельефом дневной поверхности данного района, которая плавно понижается здесь с юго-востока на северо-запад с соответствующими высотами от 2550 м до 1830 м (Рис 7.1). По направлению к побережью за пределами района исследований в северо-западном направлении уклон дневной поверхности становится больше, что объясняет увеличение скорости движения льда на поверхности в этом направлении. Трудно объяснить такое направление движения льда в этом районе рельефом подлёдной поверхности (см. Рис. 7.9, Граф. 12).

В соответствии с приводимыми ранее сравнениями, из-за снижения степени подвижности, скорость движения поверхностных слоёв льда, видимо, уменьшается с

глубиной и именно поэтому ниже границы несогласия ледниковый покров на радиолокационных записях имеет иное строение.

В средней зоне ледник имеет чётко выраженные слои, разделённые друг от друга уверенно различимыми границами. Вероятно, накапливающиеся в ходе оледенения слои льда подвергались внешним воздействиям, которые привели к образованию хорошо видимых складок, имеющих синклинальный и антиклинальный характер. На радиолокационных разрезах в региональном плане положение слоёв льда близко к горизонтальному, с небольшим уклоном в сторону побережья. Хорошо заметно почти параллельное опускание слоёв льда по всей мощности ледникового покрова над локальными понижениями подстилающего каменного основания. Изменения положения слоёв льда, проявляющиеся в виде складок над провалами в подстилающем основании и имеющих синклинальный характер, могли образоваться только под воздействием вертикальных воздействий, приведших к неравномерному опусканию слоёв льда. В ледниковом покрове практически отсутствуют антиклинальные складки, образующиеся при воздействии внешних сил на слои осадков снизу и поднимающих отдельные слои льда относительно соседних. Характер образовавшихся складок, а именно различная их амплитуда, говорит о том, что опускание слоёв льда идёт по площади неравномерно. Более интенсивно этот процесс выражен в тех местах, где глубина подлёдной поверхности максимальна.

На радиолокационных разрезах заметно, что мощность слоёв льда в ядре синклинальных складок несколько больше, чем на крыльях и за её пределами. Это может говорить о том, что опускание дневной поверхности и слоёв льда было уже в тот период, когда накапливался очередной слой.

Синклинальные складки над симметричными отрицательными структурами подлёдной поверхности также в большинстве симметричны. На тех радиолокационных разрезах, где хорошо прослеживается каменное основание, практически отсутствуют горизонтальные смещения, как отдельных элементов этих структур, так и структур целиком от пониженных участков каменного основания. Не наблюдается и резких изменений мощности отдельных слоёв льда, ограниченных изохронными поверхностями, за исключением изменений мощности слоёв в ядре, о которых говорилось ранее. Это может говорить только об отсутствии горизонтального смещения, как отдельных слоёв, так и всей массы льда в этой зоне. В дополнение к временному радиолокационному разрезу по маршруту, который имеет субмеридианальное направление С-Ю (Рис. 1), можно привести ещё два разреза: по маршруту субширотного направления З-В (Рис 2) и маршруту, проходящему через весь район исследований в направлении СВ-ЮЗ (Рис 3). На всех приведённых разрезах заметно, что признаков смещения, хорошо видимых в средней зоне II синклинальных складок, нет ни в одном направлении. Вследствие этого, на временных радиолокационных разрезах, как правило, форма промежуточных слоёв во льду в зоне II повторяет форму подстилающего каменного основания. Это позволило, при интерпретации данных аэро-радиолокационных исследований 57 РАЭ в программе SeysVision оцифровывать подледниковую поверхность на радиолокационных разрезах в тех местах, где она не прослеживается напрямую, делать это по поведению промежуточных слоёв в ледниковом покрове (см. раздел 7.3.3). Образование же самих складок в зоне II может быть объяснено процессами, происходящими в нижней зоне ледникового покрова (зоне 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.

3

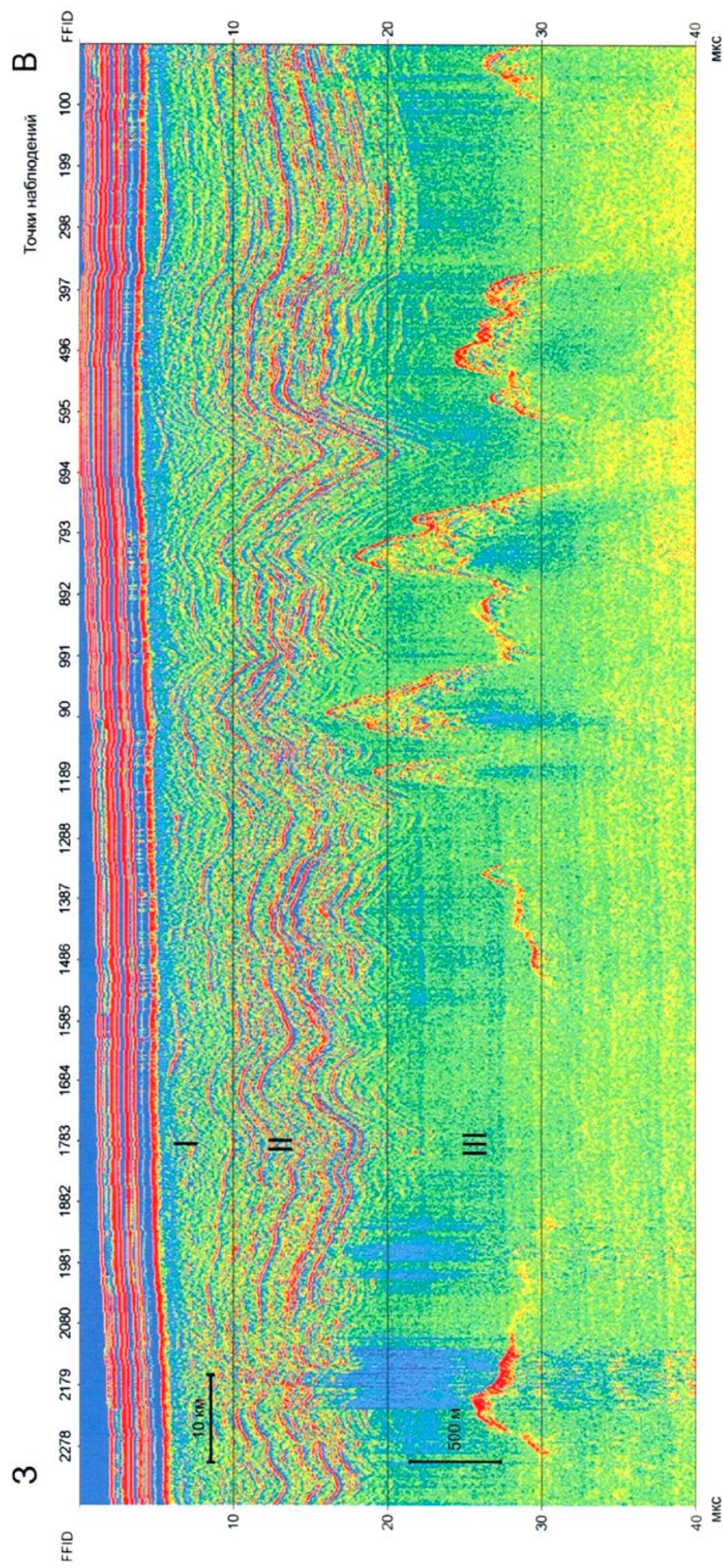


Рис. 2. Отсутствие видимых смещений структур в средней части ледникового покрова относительно каменного основания в западном или восточном направлениях

Маршрут 57206 (с06 на Рис 7.1). I, II, III – зоны в ледниковом покрове. Вертикальный масштаб в метрах дан для скорости распространения электромагнитных волн во льду 168 м/мкс

Наиболее логично предположить, что в зоне III в самой нижней её части происходит разрушение льда, и вынос продуктов разрушения за пределы той области, где это происходит. При тепловом потоке, принятом для Антарктиды $0,055 \text{ мВт/м}^2$, и мощности ледникового покрова от 1200 м до 2900 м в данном районе (см. Рис. 7.8, Граф 11) практически на всей площади может происходить разрушение нижнего слоя льда вследствие таяния. В этом случае, образование однородного слоя (зона III) и складок в зоне II вполне объяснимо и такой характер льда в зоне III является результатом воздействия на него высоких давлений и температур, близких к температуре плавления, и самой талой воды. В настоящее время невозможно точно определить, в каком виде присутствует лёд (или вода, или их комбинация) в этой зоне, но однозначна связь образования этой зоны во льду с таянием его нижней поверхности.

В этом районе размер образовавшихся складок может достигать десятков километров в плане и несколько сотен метров по высоте (Рис 1–Рис 3). Объяснением такого обширного распространения складок в леднике и их больших амплитуд может быть отвод талой воды из мест таяния. Только при постоянном отводе воды из места таяния в нижней части ледника постоянно высвобождается объём, который под действием сил гравитации заполняется вышележащими слоями льда. За счёт этого и происходит погружение слоёв льда и образование складок. В данном районе, расположенном на удалении 200–250 км от побережья, отвод талой воды в окружающие моря возможен по глубоким каньонам с глубиной до 700 м северного и северо-западного простираения (см. Рис. 7.9, Граф 12).

Таким образом, по результатам анализа радиолокационных разрезов, полученных в ходе комплексных аэрогеофизических исследований масштаба 1 : 500 000 в 57 РАЭ, можно сделать несколько важных выводов для понимания строения ледникового покрова в районе исследований и тех физических процессов, которые здесь происходят.

1. К ледниковому покрову Антарктиды вполне применимы те понятия, которые применяются в геологии к осадочным образованиям;
2. По радиолокационным данным по хорошо выраженным различиям на временных радиолокационных разрезах ледниковый покров Антарктиды в районе исследований можно уверенно разделить по вертикали на три зоны, имеющие различное строение;
3. На радиолокационных разрезах в начальной части записи находят своё отражение процессы, происходящие в верхней части ледникового покрова, а именно движение льда, наблюдаемое на поверхности. С глубиной это движение затухает, определяя строение средней основной зоны в ледниковом покрове;
4. В средней зоне, имеющей хорошо выраженное слоистое строение, форма слоёв повторяет рельеф подстилающего каменного основания. Здесь хорошо видны образовавшиеся под воздействием внешних воздействий складки, имеющие преимущественно синклинальный характер, т.е. возникшие при опускании слоёв льда;
5. В средней зоне практически отсутствуют признаки смещения образованных структур из мест формирования в каком-либо направлении, что говорит об отсутствии движения основной массы ледника;
6. Образование складчатости в средней зоне ледникового покрова связано с процессами, происходящими в нижней (однородной на радиолокационных разрезах) зоне. Здесь происходит разрушение нижних слоёв льда, вероятнее всего в результате таяния;
7. Видимо, происходит вынос продуктов разрушения нижнего слоя ледникового покрова, а именно талой воды по подлёдным каньонам в окружающие моря.

В соответствии с полученными результатами анализа радиолокационных разрезов, можно предложить следующие рекомендации, которые позволят уточнить строение ледникового покрова и глубже понять процессы, которые в нём происходят.

1. Необходимо уделить более пристальное внимание изучению верхней части ледникового покрова до видимой на радиолокационных разрезах границы несогласия;
2. Необходимо уточнить скорости распространения электромагнитных волн в различных частях ледникового покрова;
3. Необходимо определить возраст слоёв льда в прибрежной части ледникового покрова, что, возможно, позволит подтвердить наличие разрушения его нижней поверхности и оценить скорость погружения слоёв льда на различных участках;

Литература

1. Атлас океанов. Антарктика. С-Пб. Изд. ГУНиО МО РФ, Гос. Научный центр РФ, ААНИИ, 2005. С 185.
2. Богородский В.В., Ч. Бентли и др. Радиогляциология. Л-д. Гидрометеиздат 1983г., с. 122.
3. Серпухов В.И., Билибина Т.В., Шалимов А.И. и др. Курс общей геологии. Л., «Недра», 1976, 535 с.

Ведущий геофизик АГП



Кузнецов А.И.