

Гигантская водяная подушка под ледником?

(О наличии обширного водного бассейна
под ледниковым покровом Центральной Антарктиды)

А.И. Кузнецов, А.А. Лайба

ФГУНПП «ПМГРЭ, 198412, Санкт-Петербург, г. Ломоносов, ул. Победы, д. 24

E-mails: aik_@mail.ru, Laibageo@peterlink.ru

На основе данных наземного радиолокационного зондирования по району российской станции Восток и профилю станция Восток — обсерватория Мирный обосновывается возможность наличия под Центрально-Антарктическим ледниковым покровом обширного водного бассейна, образующегося за счёт таяния нижней кромки ледника. Приводится сравнение новой и общепринятой точек зрения на существование талой воды под ледником, рассматриваются критерии границы лёд—вода и определяется физическая сущность этой границы; рассчитываются средние скорости распространения электромагнитных колебаний для трёхслойной модели Центрально-Антарктического ледникового покрова: фирн—лёд—вода.

Предисловие

Настоящая работа является первой в задуманной авторами серии работ по пересмотру модели строения ледника в центральных районах Антарктиды. Во второй статье будут рассмотрены, в рамках новой модели, вопросы влияния низкоскоростного слоя воды, расположенного под ледником, на формирование временных разрезов, получаемых при радиолокационных зондированиях; по характеру границ водного слоя будут определены признаки горизонтального и вертикального смещения ледника; обосновано существование водных токов и их вероятные направления.

В третьей статье будет рассмотрен облик погребенного коренного рельефа и обосновано существование в районе станции Восток крупной подледниковой долины, вероятно, тектонического генезиса; будет дана ее морфологическая характеристика и обрисованы черты строения прилегающего рельефа. По выявленным особенностям подледного рельефа будут показаны наиболее вероятные участки дренажа талых вод под ледниковым покровом. Будут рассмотрены также особенности строения прибрежных ледников и существование под ними устьевых каналов стока, непосредственно выводящих избыток вод в океан.

В четвертой статье будут проанализированы материалы российских сейсмических исследований в районе станции Восток. Будет показана возможность непротиворечивой увязки сейсмических данных с основными акустическими границами новой модели строения ледникового покрова, подстилаемого сравнительно мелководным, но обширным водным бассейном.

Актуальность рассматриваемой проблемы

Антарктический ледниковый покров является крупнейшим на нашей планете, площадь его составляет 13,94 млн км², объём льда 25,58 млн км³, и он превосходит свой арктический аналог, Гренландский ледник, по площади и объёму более чем в 10 раз (Атлас океанов, 2005). На антарктическом континенте сосредоточено более 90 % всех материковых льдов, а значит и чистейшей пресной воды. Уже сейчас во многих районах планеты население испытывает недостаток в питьевой воде, поэтому понятен тот поистине глобальный интерес к ледниковому покрову Антарктиды, выражаемый, в том числе, в разработке различных планов по доставке антарктического льда в засушливые районы планеты.

Международные исследования последних лет свидетельствуют, что под антарктическим ледниковым покровом может находиться и самая настоящая вода в своем натуральном жидком состоянии. Из материалов данной статьи следует, что вода может формировать под Центрально-Антарктическим ледником обширный бассейн, превосходящий по площади все крупнейшие озера и даже моря. Подледниковый бассейн имеет, вероятно, протяженные подледные каналы для сброса избыточных вод непосредственно в Южный океан. Поиски таких каналов и «подключение» к ним могло бы обеспечить в будущем целые танкерные флотилии чистой воды, легко развозимой, в отличие от айсбергов, по всем засушливым районам нашей планеты.

Анализ радиолокационных данных

В настоящее время обширные площади ледникового покрова Антарктиды уже достаточно хорошо изучены радиолокационным методом, и по результатам наземного и воздушного зондирования написано множество статей, в которых

приводится общепринятая на сегодня модель строения ледниковых толщ. Принципиальный механизм радиолокационного зондирования ледников хорошо известен и показан на рис. 1.

На сегодня считается установленным, что жидкая вода находится под ледником в форме так называемых подледниковых «озёр». Все эти «озера» выделяются по наличию подо льдом участков с выровненными и четкими границами (участок «е» на рис. 1). Размеры этих участков, как правило, невелики, поэтому вода под ледником и существует в виде локальных «озёр». Впрочем, таких «озерных» участков уже выделено огромное множество: 176 «озер» на 2007 г., и количество их продолжает расти. Наиболее обширным и первым из обнаруженных является «озеро» в районе станции Восток (Kapitsa et al., 1996 и др.). Это подледниковое «озеро» уже достаточно хорошо изучено и многократно описано. Там же на станции Восток, удачно расположенной над южной оконечностью «озера», проводится многолетнее бурение скважины 5Г-1, которая к началу 2008 г. достигла отметки 3666,5 м (Новости МПГ, 2007/08).

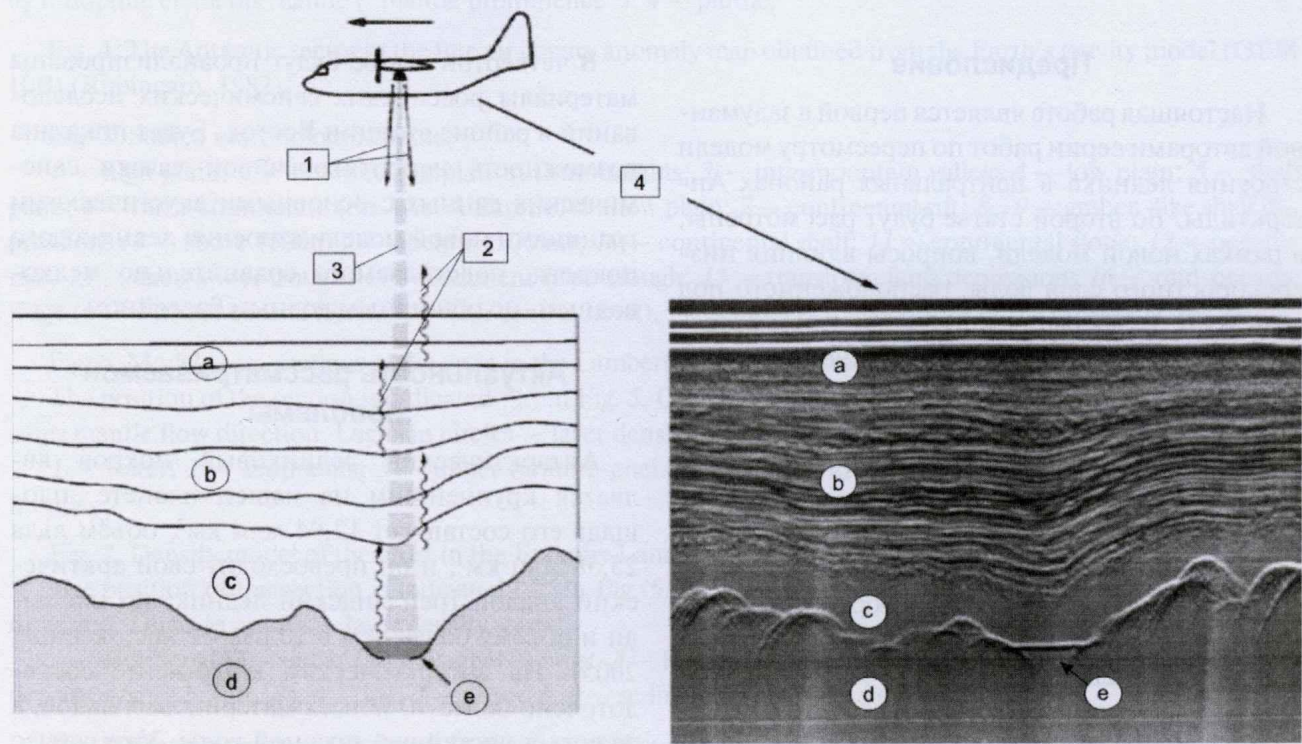


Рис. 1. Принцип проведения радиолокационных зондирований и временной разрез изученной толщи (по Siegert, 2005).

1 — излучаемые электромагнитные волны (радиолокационный сигнал с частотой 60 МГц); 2 — реакция изучаемой среды в виде отраженных электромагнитных волн, принимаемых антенной; 3 — угол излучения передающей антенны; 4 — полученный временной монтаж изученной среды: а — поверхностная часть ледника (фирн); b — ледниковая толща с хорошо выраженной слоистой структурой; с — верхняя однородная зона, отождествляемая по общепринятой модели с массивным ледником; d — фундамент; e — нижняя однородная зона, отождествляемая по общепринятой модели с толщей воды.

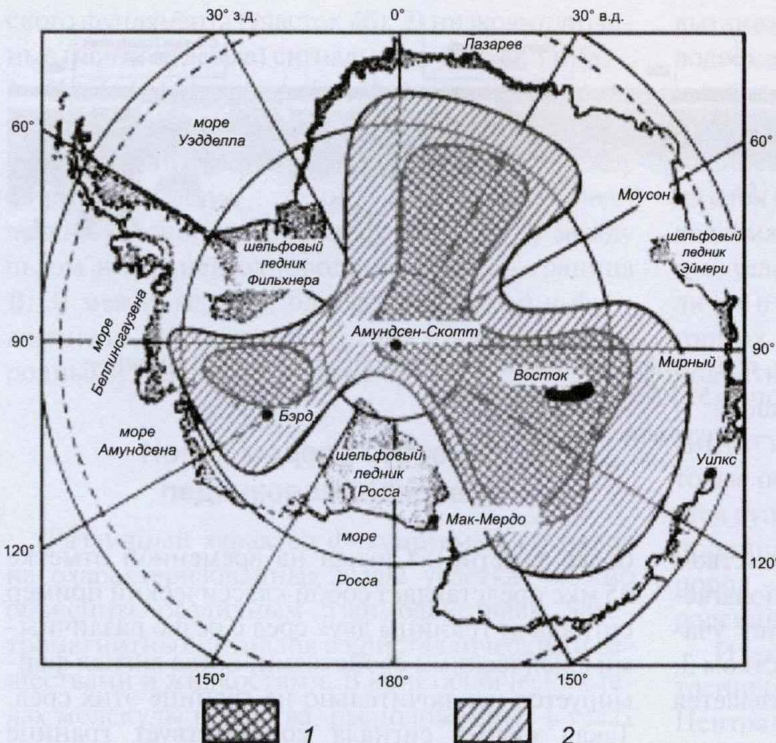


Рис. 2. Расчетная карта областей Антарктиды, охваченных донным таянием при разных значениях геотермического потока (Зотиков, 2000).

Донное таяние при геометрическом потоке: 1 — среднем для земной коры, 2 — вдвое большем.

рость донного таяния льда составляет примерно 5—6 мм в год (Зотиков и др., 1965).

Если внимательно проанализировать доступные материалы по радиолокационному зондированию в Антарктиде (работы экспедиции ПМГРЭ и др.), можно найти достаточно много указаний на существование под ледником обширной зоны донного таяния, — той самой, о ко-

торой писали И.А. Зотиков с коллегами еще 40 лет назад.

Первое, что бросается в глаза при изучении радиолокационных данных — это то, что верхняя однородная зона (область «с» на рис. 1), резко отличная от вышележащей слоистой толщи, имеется практически на всех радиолокационных временных разрезах, полученных во внутриконтинентальных областях Антарктиды. Эта однородная зона возникает на некотором расстоянии от побережья и тянется непрерывно вглубь материка, причём верхняя граница этой зоны в главных чертах повторяет рельеф подстилающего основания (рис. 3).

Специалисты, занимающиеся радиолокационным зондированием, объясняют наличие верхней однородной зоны «с» простым затуханием с глубиной радиолокационного сигнала в ледниковой толще. Однако после столь впечатляющего затухания вдруг возникает на еще большей глубине весьма интенсивный и хорошо выраженный сигнал от фундамента. (Здесь и далее под фундаментом подразумевается сигнал от самой нижней границы на радиолокационном разрезе по аналогии с акустическим фундаментом при сейсмических исследованиях: сам фундамент может быть представлен как кристаллическими, так и осадочными породами).

Выводы, противоречащие гипотезе «затухания», можно также получить из анализа амплитудных кривых радиолокационного зондирования

Казалось бы, всё ясно и понятно, и что принципиально нового можно сказать о пробуренном почти насквозь леднике, да и о самом «озере», надежно «оконтуренном» и расписанном во множестве статей? И все же проблема существует, и весьма серьезная, связанная в первую очередь с интерпретацией дистанционных измерений. Накопленные за последние десять лет радиолокационные материалы свидетельствуют, по мнению авторов, о принципиально иных формах и условиях нахождения воды под антарктическим ледником.

Ещё в 1965 году, в самом начале серьезного изучения Антарктиды, в статье И.А. Зотикова, А.П. Капицы и О.Г. Сорохтина «Тепловой режим ледникового покрова Центральной Антарктиды» были охарактеризованы основные условия, необходимые для процесса донного таяния покровных ледников. Авторы писали о «критической толщине ледника», при которой таяние становится возможным, и приводили графики исходных данных для расчета полей температур и критической толщины ледникового покрова на профиле станция Восток — станция Молодежная. Из приведенных расчетов следует, что при величине геотермального потока $q = 2,5 \times 10^{-6}$ кал/см² в секунду донное таяние должно охватить всю центральную область ледяного щита Антарктиды, пересеченного профилем станция Восток — станция Молодежная (рис. 2). По И.А. Зотикову с соавторами ско-

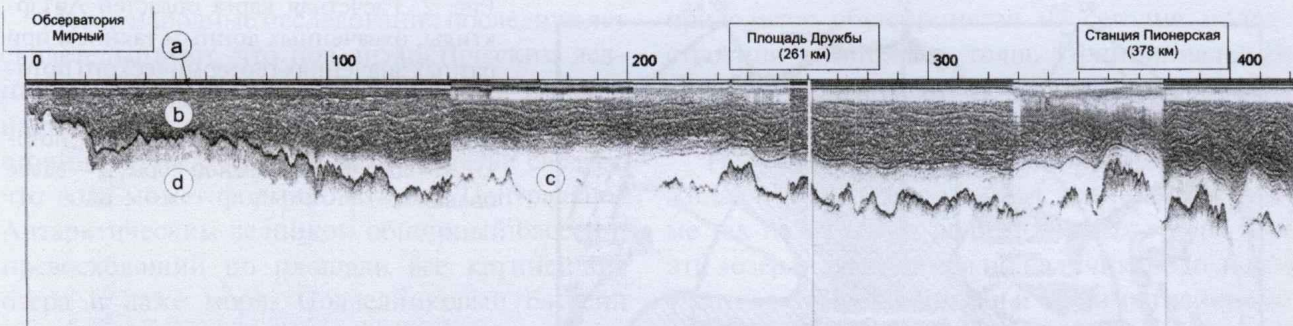


Рис. 3. Фрагмент радиолокационной записи, полученной на профиле трассы обсерватория Мирный — станция Пионерская (Попов С.В., полевой отчёт 51 РАЭ, с изменениями).
a — фирн, b — ледник, c — однородная зона, d — фундамент.

ния (рис. 4). По принятой сейчас большинством исследователей модели, районам предполагаемых подледниковых «озёр» соответствует участок 4а, имеющий резкую границу с участком 3, причем последняя (граница С) отождествляется ими с границей лёд—вода.

На этом же рисунке в первую очередь впечатляет высокая энергетика принятых антенной электромагнитных сигналов от фирна и льда (участки 1 и 2), тогда как на участках 3 и 4а принятые антенной сигналы практически равны нулю (локатор РЛС-60-06 имеет пониженный уровень аппаратного шума, поэтому там это

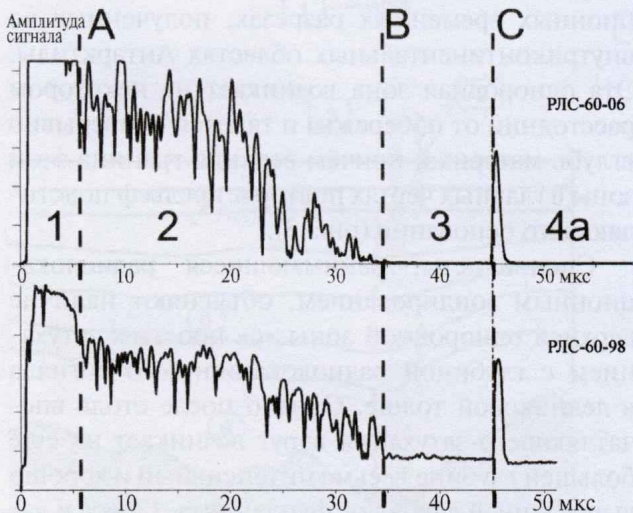


Рис. 4. Амплитудные записи радиолокационных сигналов в точке 78° 29,640' ю.ш., 106° 35,570' в.д., полученные с помощью ледовых локаторов РЛС-60-06 (разработка 2006 г.) и РЛС-60-98 (разработка 1998 г.) (С.В. Попов, полевой отчёт 53 РАЭ, с дополнениями).
Характер электромагнитных сигналов, принятых приемной антенной на различных участках: 1 — от фирна; 2 — от слоистого льда; 3 — от верхней однородной зоны; 4а — от нижней однородной зоны, отождествляемой по общепринятой модели с подледным водоёмом.

более заметно). Сигнал на временной отметке 45 мкс представляет собой классический пример сигнала от границы двух сред с резко различными физическими свойствами, когда сигнал формируется исключительно на границе этих сред. Такая форма сигнала соответствует границе между зонами «с» и «е» на рис. 1.

Сигнал от фундамента, сложенного кристаллическими породами, также обладает высокой энергетикой, несмотря на то, что он формируется ниже однородной зоны «с», где якобы затухает первоначальный сигнал (рис. 5).

Таким образом, на показанных выше временном радиолокационном разрезе и амплитудных кривых (рис. 1, 4, 5) присутствуют два типа принятых антенной сигналов, различающихся по амплитуде: 1) высокоэнергетические сигналы от снежно-фирнового верхнего слоя ледника (участок 1), слоистого льда (участок 2) и кристалличе-

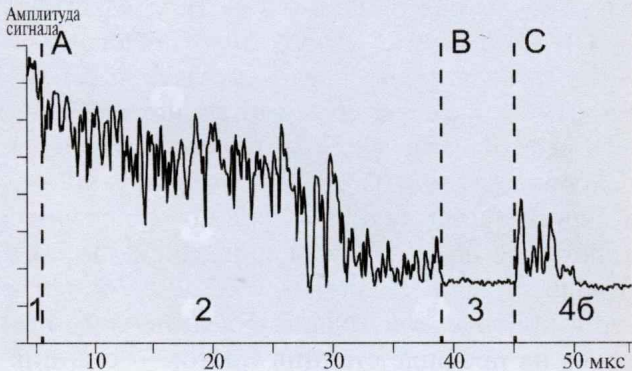


Рис. 5. Амплитудная запись радиолокационного сигнала, полученного на маршруте S-51 в районе станции Восток (С.В. Попов, полевые материалы 51 РАЭ, с дополнениями).

Характер электромагнитных сигналов: 1 — фирн; 2 — слоистый лёд; 3 — верхняя однородная зона (вода); 4б — кристаллический фундамент.

ского фундамента (участок 4б); 2) низкоамплитудные (почти нулевые) сигналы на участках 3 и 4а.

Кроме того, выделяется одна условная и две четких границы раздела сред с хорошо выраженными сигналами на этих границах: 1) между фирном и льдом — граница А (может быть выделена условно по характеру записи); 2) между льдом и верхней однородной зоной — граница В; 3) между верхней однородной зоной и фундаментом, либо между верхней и нижней однородными зонами — граница С.

Новая модель строения ледникового покрова

Различный характер фиксируемых сигналов на охарактеризованных выше участках можно объяснить различным взаимодействием электромагнитных сигналов с кристаллическими веществами и жидкостями. В кристаллических телах молекулы вещества, расположенные в узлах регулярной кристаллической решетки, способны отражать электромагнитные колебания в определённых направлениях. В таком случае «нулевой» уровень принятого электромагнитного сигнала на участке 3 можно объяснить тем, что там находится однородное вещество, к которым относятся все жидкости.

Если по общепринятой модели участок 4а, показанный на рис. 4, отображает слой воды, то что тогда располагается выше на участке 3 и отделено от «воды» такой резкой и четкой границей С? Наиболее естественной на взгляд авторов является следующая интерпретация: верхняя однородная зона (участок 3), отвечающая по своим радиолокационным характеристикам жидкости, является ничем иным, как обширным слоем талой воды, а зона 4а отображает, вероятно, изолированные участки выровненных и слабо консолидированных осадков, образованных из мелких частичек пыли и небольших фрагментов кристаллических пород, вытаявших из подошвы ледника.

Известно, что антарктический ледниковый покров содержит в себе достаточное количество минеральной и органической пыли, заносимой ветрами на его поверхность, а затем, по мере наращивания снежных осадков, уходящей вглубь ледника. По-видимому, наблюдаемая слоистая структура льда (участок 2) частично связана с сезонными колебаниями пылевых концентраций в образуемых регулярно слоях. Опустившись за многие тысячи лет до нижней кромки ледника, где действуют процессы таяния, частички пыли

вытаивают и оседают на дно подледникового водоёма в форме пелитовых осадков. В хорошо выраженных донных депрессиях мощность осадочного слоя будет повышенной за счет бокового сноса и придонных течений, а верхняя граница слоя будет ровной и гладкой, как и всякое дно водоёма, длительно развивающегося в спокойных условиях. В составе осадков возможно и наличие в небольших объемах различных обломков горных пород, захваченных ледником с донных поднятий и «утерянных» на участках таяния.

Мощный отражённый радиолокационный сигнал на границе С, разделяющей воду и пелитовые осадки (участки 3 и 4а на рис. 4) объясняется существенной разницей в диэлектрической проницаемости двух сред: воды — 88, горных пород — 10, сырого песка, глины — 5,0 (Богородский и др., 1983).

Итак, в интерпретации авторов модель внутреннего строения ледникового покрова в Центральной Антарктиде представляется следующей (сверху вниз): фирн — тонкослоистый лед — обширный слой талой воды — кристаллический или осадочный фундамент (основание). В отдельных хорошо выраженных депрессиях фундамента (например, подледниковая долина озера Восток и др.) залегает слой пелитовых осадков повышенной мощности, механизм образования которых показан выше.

Мощность слоя воды можно определить по временному интервалу участка 3 на рис. 4, который равен 10 мкс. При скорости распространения электромагнитных колебаний в воде, равной 33 м/мкс (Богородский и др., 1970), мощность слоя воды составит 165 м. Проникаем ли такой слой воды для электромагнитного излучения? Вполне! Ведь, как известно, вода, образовавшаяся при таянии ледника, является, по сути, дистиллированной водой, ибо сам ледник образован из атмосферных осадков. Пресная, и тем более дистиллированная вода, на частотах выше 200 кГц так же, как и лёд является диэлектриком, т.е. хорошим проводником электромагнитных колебаний (Гольдштейн, Зернов, 1971), — вот, что упускают из виду авторы предыдущих интерпретаций. На рис. 6 представлены частотные зависимости удельного ослабления для дистиллированной воды, пресной воды и пресного льда при условии, что электромагнитный сигнал излучается непосредственно в изучаемую среду. При частотах радиолокации, составляющих 60 МГц, удельное ослабление для слоя дистиллированной воды такой мощности равно примерно 0,1 дБ (кривая 1), тогда как ослабление

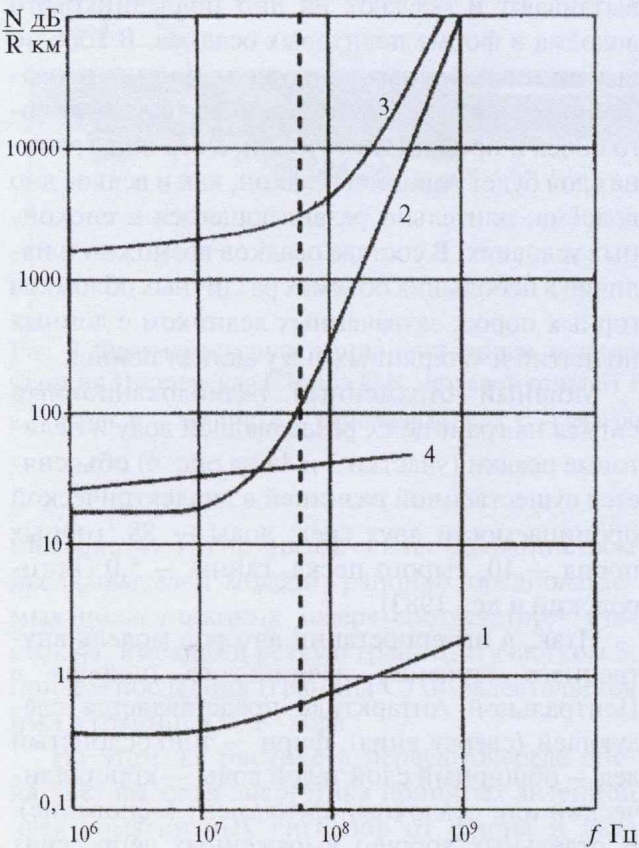


Рис. 6. Частотные зависимости удельного ослабления амплитуды электромагнитных колебаний (Богородский и др., 1970).

Кривые удельного ослабления: 1 — дистиллированная вода; 2 и 3 — пресная (слабоминерализованная) вода; 4 — пресный лёд. N — ослабление; R — расстояние до объекта. Прерывистой линией выделена частота, используемая при радиолокации льда (60 мГц).

для трёхкилометрового слоя льда составляет уже 120 дБ. Следовательно, можно утверждать, что через слой воды указанной мощности и близкой по своим характеристикам к дистиллированной воде, электромагнитная волна проходит практически без ослабления. Уместно заметить, что солёная (морская) вода на этих же частотах является проводником, т.е. хорошо отражает электромагнитные волны.

В общепринятой модели строения ледника границе лёд—вода соответствует граница С между участками 3 и 4а (рис. 4), но может ли быть эта граница столь ровной и четкой? Чтобы определить, что представляет из себя эта граница, необходимо вспомнить, что границей лед—вода является некая условная линия, где число молекул воды равно числу кристаллов льда, и на временных радиолокационных разрезах она не обязательно должна отображаться четко выра-

женной линией. При наличии переохлаждённой воды и крупных ледяных кристаллов зона перехода из одной фазы в другую может иметь значительную мощность.

В новой авторской интерпретации границе лед—вода на временных радиолокационных разрезах соответствует граница В (рис. 4, 5). Она, несомненно, является границей двух различных сред, причем верхняя однородная зона (участок 3) больше соответствует по своим радиолокационным признакам не ледниковой толще, а именно жидкой воде: в ней отсутствует всякая слоистость и существенно снижена амплитуда сигнала.

Расчёт пластовых скоростей для новой модели

Для определения глубины залегания нижней кромки ледника, а также фундамента необходимо знать скорости распространения электромагнитных колебаний в слоях, составляющих новую модель. Сверху вниз можно выделить следующие слои, составляющие изучаемую модель: воздух, снег, фирн, лёд, переходная зона лед—вода, собственно вода и фундамент. Подробное изучение скоростных характеристик всей модели выходит за рамки данной статьи, пока же для упрощения можно объединить несколько слоёв и выделить только главные: воздух, снег+фирн, лёд, вода и фундамент. В этой модели плотности вещества с глубиной увеличиваются, а скорости распространения электромагнитных колебаний уменьшаются. Для расчёта пластовых скоростей модели принимается условие, что средняя скорость для всего массива ледника (включая водный слой) должна быть близка к полученным ранее для этого района значениям: $168,5 \pm 0,5$ мкс (Попов и др., 2001).

На рис. 4 фирну и льду соответствуют высокочастотные сигналы в начальной части записи и постепенное уменьшение сигналов до времени 35 мкс (участки 1 и 2). Слою воды соответствует зона отсутствия сигнала на временах 35—45 мкс (участок 3). На отметке 45 мкс наблюдается сигнал от границы вода—фундамент. По данным изучения ледового керна скважины 5Г-1 можно выделить несколько основных глубинных границ, сопоставимых с радиолокационной картиной рассматриваемой модели, верхняя граница расположена на глубине около 300 м, где резко меняются изотопный состав льда и размер ледяных кристаллов; несколько глубже (около 700 м) находится граница, где замедляются процессы перекристаллизации льда

Параметры строения ледника в районе станции Восток

№ слоя	Состав слоя	Мощность слоя (пласта), м	Δt , мкс (из рис. 4)	Пластовая скорость электромагнитных волн, м/мкс
1	Фирн	718	5,75	249,5
2	Лёд	2891	29,25	199,0
3	Вода	165	10,00	33,0

и укрупнения кристаллов; и, наконец, нижняя граница на глубине 3609 м, до которой прослеживается ледовая толща с инородными микро-частицами включений, а ниже которой следует чистый озёрный лёд (Липенков и др., 2000). Исходя из этого, глубину 700 м можно условно принять за подошву верхней снежно-фирновой толщи, а глубину 3609 м можно посчитать за нижнюю кромку ледника, где вступают в действие процессы таяния (намерзания). Так как амплитудные кривые, показанные на рисунках 3 и 4, получены в непосредственной близости от скважины 5Г-1, они были использованы для определения времён от каждой границы (кроме воздуха и самой верхней границы, для которой трудно определить время по имеющимся кривым). Значения рассчитанных глубин залегания условных границ и пластовых скоростей, в наибольшей степени удовлетворяющих принятой модели, приведены в табл. 1.

Среднюю скорость для всех трех слоев можно определить по следующей формуле (Гурвич, 1975):

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3}{\frac{\Delta h_1}{v_1} + \frac{\Delta h_2}{v_2} + \frac{\Delta h_3}{v_3}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость распространения электромагнитных колебаний в обобщенном слое; Δh_n — мощность n -го слоя; v_n — пластовая скорость n -го слоя.

Вычисленная по формуле 1 средняя скорость для трёхслойной среды при значениях пластовых скоростей из табл. 1 равна 168,44 м/мкс, что близко к приведённому ранее значению (Попов и др., 2001). В любом случае, высокие скорости верхней части разреза компенсируются низкой скоростью в слое воды, иначе средняя скорость для всего разреза будет высокой.

Для глубинных построений достаточно найти среднюю скорость объединенных слоёв фирна и льда. Вычисленная по формуле (1), она равна

207,35 м/мкс. Для более строгих расчётов глубины залегания нижней кромки ледника необходимо переходный слой лёд + вода учитывать как четвёртый слой модели со своей пластовой скоростью. Она может быть определена по формуле расчета скорости распространения волн в гетерогенной среде, состоящей из двух компонентов, в данном случае из воды и льда (Мачерет, 1977):

$$V^{(2)} = V_1 \left(1 + \frac{f_2}{f_1} \right) \left\{ \left(1 + \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \left[1 + \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где $V^{(2)}$ — скорость распространения волны в двухкомпонентной гетерогенной среде; f_1 — процентный объём одной из компонент; ρ_1 — плотность одной из компонент; V_1 — скорость распространения волны в одной из компонент.

Для расчётов принимались следующие значения: плотность льда $\rho_1 = 0,915$ г/см³, скорость $V_1 = 199$ м/мкс, плотность воды $\rho_2 = 1,0$ г/см³, $V_2 = 33$ м/мкс. Полученные по формуле (2) значения скорости движения электромагнитной волны в смеси льда и воды в зависимости от процентного содержания воды, приведены на рис. 7.

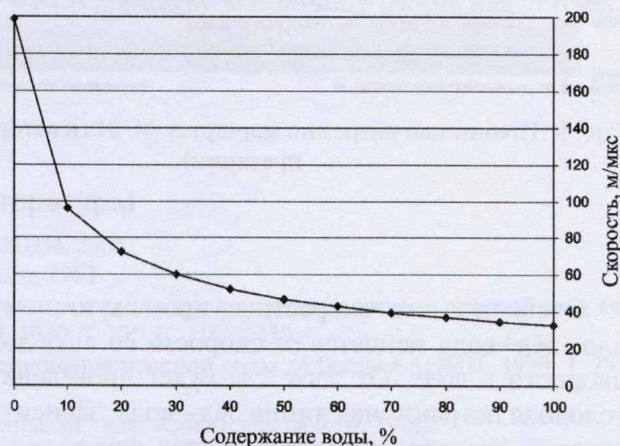


Рис. 7. Изменение скорости распространения электромагнитных волн в зависимости от процентного содержания воды во льду (расчёты по формуле (2)).

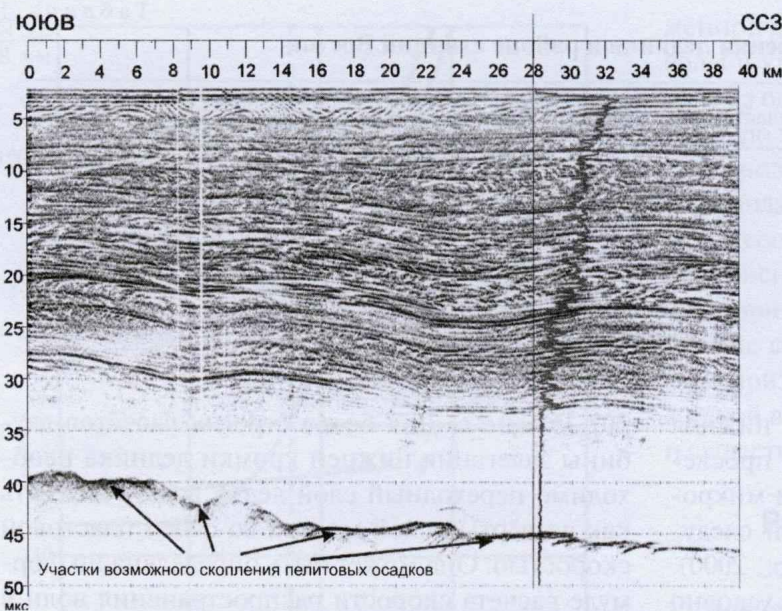


Рис. 8. Временной разрез по маршруту М-01, район станции Восток в авторской интерпретации (Производственный отчёт 51 РАЭ, с дополнениями).

Вертикальной линией показано положение и форма амплитудной кривой.

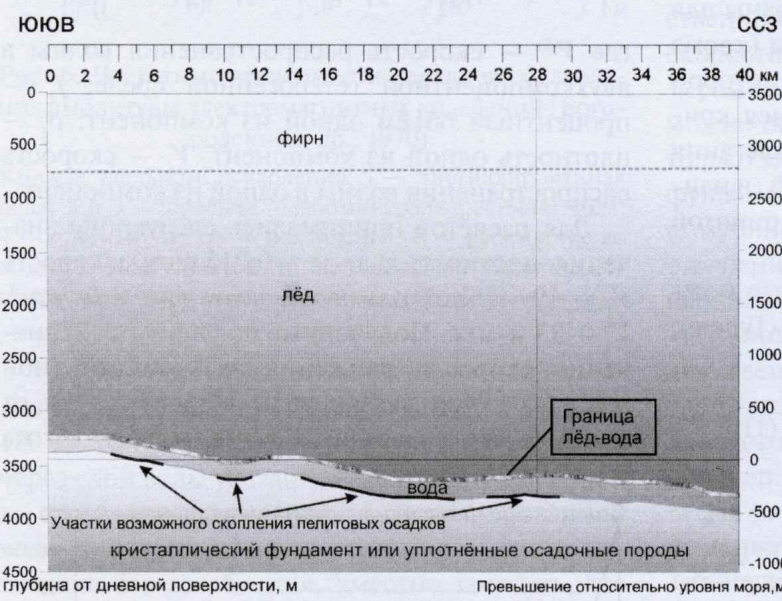


Рис. 9. Глубинный разрез по маршруту М-01 (в авторской интерпретации).

Очевидно, что скорость в промежуточном слое лёд+вода меняется от скорости во льду до скорости в воде. От того, где будет проведена условная пограничная линия лёд—вода, зависит средняя скорость суммарного слоя фирн+лед, принимаемая для дальнейших расчётов. Эта линия может быть проведена в самом начале зоны

таяния, где появляются первые признаки наличия воды (начало резкого ослабления сигнала по амплитуде), либо там, где полностью пропадают все признаки слоистой структуры ледника, то есть в области чистой воды; наконец, она может быть проведена как срединная линия между этими признаками. Определение скорости распространения электромагнитных колебаний в промежуточном слое лёд+вода осложняется тем, что точно неизвестно в каком процентном отношении представлены на различных участках переходной зоны лёд и вода.

Итак, для оценочных глубинных построений может быть принята следующая упрощённая модель строения ледника и соответствующие ей скорости: фирн+лёд+переходный слой лёд+вода — средняя скорость 207 м/мкс, вода — скорость 33 м/мкс; за нижнюю кромку ледника принята средняя линия видимой переходной зоны лёд+вода. Более строгое определение модели требует дополнительного анализа всех имеющихся радиолокационных материалов для данного района.

На рис. 8 представлен временной разрез по маршруту М-01, полученный в районе станции Восток в 51 РАЭ, на котором вертикальной линией отмечено положение амплитудных кривых, показанных на рис. 4. С использованием оговоренных выше допусков произведён пересчёт этого временного разреза в глубинный интерпретационный разрез (рис. 9). Положение маршрута относительно станции Восток и принятого в настоящее время контура озера Восток показано на рис. 10.

Представленный на рис. 9 глубинный разрез существенно отличается от выполненных ранее интерпретаций наличием обширного, но сравнительно тонкого слоя воды, подстилающего ледник в районе станции Восток. Рельеф фундамента на участке представляемых амплитудных кривых ни в коей мере не позволяет отнести этот участок к озеру Восток.

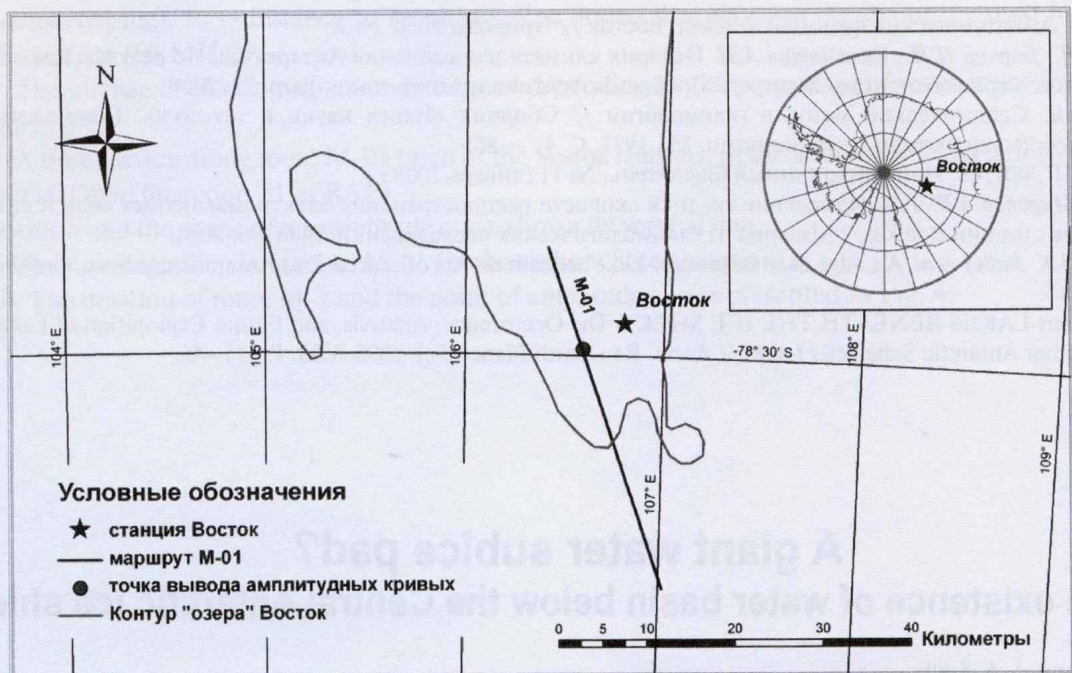


Рис. 10. Схема расположения маршрута М-01 и точка вывода амплитудных кривых, представленных на рис. 4.

Выводы

Результаты исследования, изложенные в данной статье, подтверждают идеи Н.Н. Зубова, И.А. Зотикова и других предшественников о наличии под мощным ледниковым покровом динамической зоны таяния.

По имеющимся радиолокационным данным, под внутриконтинентальным ледником в центральной Антарктиде существует обширный водный бассейн, образовавшийся за счёт таяния нижней части ледника и отображающийся на временных радиолокационных разрезах в виде однородной области между ледником и фундаментом (кристаллическим или осадочным основанием).

Вода в этом бассейне имеет сравнительно небольшую мощность, но благодаря широкому распространению зоны таяния, представляет собой постоянно пополняемое, практически неисчерпаемое крупнейшее месторождение пресной воды на планете.

Выявленные ранее под ледником многочисленные, но локальные озера отображают, вероятно, выровненные участки аккумуляции слабо консолидированных пелитовых осадков, вытесняемых из подошвы ледника.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Полярной морской геологоразведочной экспедиции С.В. Попову за предоставленные материалы и М.Б. Сергееву за помощь в работе над статьёй.

Список литературы

- Атлас океанов.* Антарктика. ГУНИО МО РФ, ГНЦ РФ, ААНИИ, 2005.
- Богородский В.В. и др.* Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983.
- Богородский В.В., Трепов Г.В. и др.* Использование электромагнитных волн, распространяющихся в пресной воде для активной локации и других целей // Труды ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 116 — 119.
- Богородский В.В., Трепов Г.В. и др.* Радиолокационное зондирование пресной воды // Труды ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 185 — 187.
- Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В.* Электромагнитные поля и волны. М.: изд. «Советское радио», 1971.
- Гурвич И.И.* Сейсморазведка. М.: Недра, 1975.
- Зотиков И.А., Капица А.П., Сорохтин О.Г.* Тепловой режим ледникового покрова Центральной Антарктиды // Бюллетень Советской Антарктической экспедиции. 1965. № 51. С. 27 — 33.

Зотиков И.А. Антарктический феномен — озеро Восток // Природа. 2000. № 2.

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. Вып. 72. 2000.

Мачерет Ю.Я. Сейсмический метод в гляциологии // Сборник «Итоги науки и техники». Гляциология. Т.1. Геофизические методы в гляциологии. М., 1977. С. 41 — 86.

Новости МПГ 2007/08. Информационный бюллетень, № 11 (январь 2008 г.).

Попов С.В., Миронов А.В. и др. Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток // Материалы гляциологических исследований. Вып. 90. 2001.

A.P. Kapitsa, J.K. Ridley et al. A Ladge deep freshwater Lake beneath the ice of central East Antarctica // Nature. 1996. V.381. N. 6584.

Martin J. Siegert 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. V.33. P. 215—45.

A giant water subice pad?

(On the existence of water basin below the Central Antarctic ice shield)

A.I. Kuznetsov, A.A. Laiba

PMGE, 198412, St. Petersburg, Lomonosov, Pobedy st., 24

The existence of huge water basin below the Central Antarctic ice shield is maintained by the on-land radio-echo sounding data obtained in the area of the Vostok Station and on rout to the Mirny Station. The water basin is thought to have accumulated due to the melting of the ice cover bottom. This new point of view is compared with common and widely accepted ideas on the presence of melt liquid below the glacier; the criteria defining the ice—water boundary, and the physical nature of this transitions are discussed; average electro-magnetic waves speed is calculated assuming a three-layer structure if the Central Antarctic Ice Shield: névé—ice—water.

Figure captions

Fig. 1. The technique of airborne radar sounding and a sample radio-echo sounding (RES) data (from Siegert, 2005, with additions).

1 — radiated electromagnetic waves (60 MHz); 2 — reflected electromagnetic waves, received by the antenna; 3 — beam width of signal; 4 — received data: a — névé; b — layered ice; c — homogeneous reflection zone identified by the common model as a massive glacier; d — the basement; e — the bottom homogeneous zone identified by the common model as water.

Fig. 2. Estimated areas of Antarctica captured by bottom melting at different geothermal flow parameters (Zotikov, 2000).

Fig. 3. A fragment of the radar echo sounding (RES) data obtained between observatory Mirny — station Pionerskaja (Popov S.V., the Field report 51-st RAE, with changes).

a — névé, b — glacier, c — homogeneous zone; d — the basement.

Fig. 4. Records of RES data at a point 78°29,640' S, 106°35,570' E., received by the means of ice locators РЛС-60-06 (manufactured 2006) and РЛС-60-98 (manufactured 1998) (Popov S.V., the Field report 53-rd RAE, with additions).

Character of the electromagnetic signals received by the reception antenna: 1 — from névé; 2 — from layered ice; 3 — from top homogeneous zone; 4a — from bottom homogeneous zone identified on the standard model with a subglacial pool.

Fig. 5. Record of radio-echo signal received on route S-51 in area of the Vostok station (Popov S. V., the Field report 51-st RAE, with additions).

Electromagnetic signals reflected from: 1 — névé; 2 — layered ice; 3 — top homogeneous zone (water); 4b — the crystalline basement.

Fig. 6. Frequency dependences of the electromagnetic fluctuations (Bogorodsky, et al., 1970).

Curves of attenuation within: 1 — distilled water; 2 and 3 — fresh (or low salinity) water; 4 — fresh ice. N —

attenuation (easing). R — distance to an object. The dotted line allocates the frequency used for radio-echo sounding of ice (60 MHz).

Fig. 7. The change of electromagnetic waves speed depending on the percentage of water in ice (calculations by formula (2)).

Fig. 8. A time section along route M-01 (area of the Vostok station), in the authors' interpretation (the data from the PMGE Open file report 51-st RAE).

The position and the shape of an amplitude curve shown by vertical line.

Fig. 9. The cross-section along route M-01 (in the authors' interpretation).

Fig. 10. The position of route M-1 and the point of amplitude curves presented in Fig. 4.