

# Отечественные сейсмические и наземные радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде накануне Международного полярного года 2007–2008

С.В. Попов<sup>1</sup>, В.Н. Масолов<sup>1</sup>, В.В. Лукин<sup>2</sup>, А.М. Попков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург;

<sup>2</sup>Российская антарктическая экспедиция (РАЭ), Санкт-Петербург

Дан краткий обзор наземных сейсмических и радиолокационных исследований в Центральной Антарктиде за последние 50 лет и, в частности, работ последнего десятилетия в районе подледникового озера Восток и вдоль профиля Мирный — Восток.

## Краткий обзор прошлых исследований

Обсерватория Мирный была основана 13 января 1956 г. и до настоящего времени служит для нашей страны воротами в Центральную Антарктиду. Она остается базой научных и логистических санно-гусеничных походов в глубь материка. С открытием станции Пионерская (27 мая 1956 г.) был сделан первый шаг к изучению центральных районов Антарктиды. Санно-гусеничные походы, выполнявшиеся по программе Международного геофизического года (МГГ), сопровождалась магнитометрическими, гравиметрическими, гляциологическими, геодезическими и сейсмическими измерениями. В следующие годы было открыто несколько внутриконтинентальных станций: Восток-1 (18 марта 1957 г.), Комсомольская (6 ноября 1957 г.), Восток (16 декабря 1957 г.), Советская (16 февраля 1958 г.) и Полюс недоступности (14 декабря 1958 г.). После открытия 23 февраля 1962 г. станции Молодежная на Земле Эндерби научные походы некоторое время выполнялись в этом районе [32]. Указанные работы дали первое представление о подледном рельефе и строении земной коры обширного участка Восточной Антарктиды [5, 8, 38], что нашло свое отражение в первом атласе Антарктики [1].

Полученные данные не потеряли своего значения и сейчас. Они были использованы при составлении сводной карты подледного рельефа Антарктиды в рамках международного проекта BEDMAP [46] и используются в работе над проектом ABRIS [26, 27]. Самостоятельное направление в изучении коренного рельефа Антарктиды получил метод отраженных волн (МОВ) (рис. 1). Такие исследования вдоль трассы Мирный — Восток проводились уже в 1956–1958 гг., во Второй континентальной антарктической экспедиции (КАЭ), и неоднократно повторялись в дальнейшие годы [5, 32]. В Третьей КАЭ (1957–1959 гг.) были выполнены исследования на участке Мирный — Комсомольская — Советская — Полюс недоступности [34], а через год проведен научный поход на Южный полюс [7]. В 1959–1961 гг. в Пятой Советской антарктической экспедиции (САЭ) был выполнен научный поход из Мирного через пункт с координатами 72° ю.ш.,

87° в.д. и далее через станцию Комсомольская на станцию Восток [39].

Отечественные радиолокационные исследования в Антарктиде были начаты в Девятой САЭ (1963–1965 гг.) [2]. В это время был проведен сложный санно-гусеничный поход из Мирного к Молодежной через Полюс недоступности и станцию Восток (см. рис. 1). Он включал сейсмическое зондирование (МОВ), магнитометрические, гравиметрические, геодезические, гляциологические и метеорологические наблюдения, что позволило составить первое

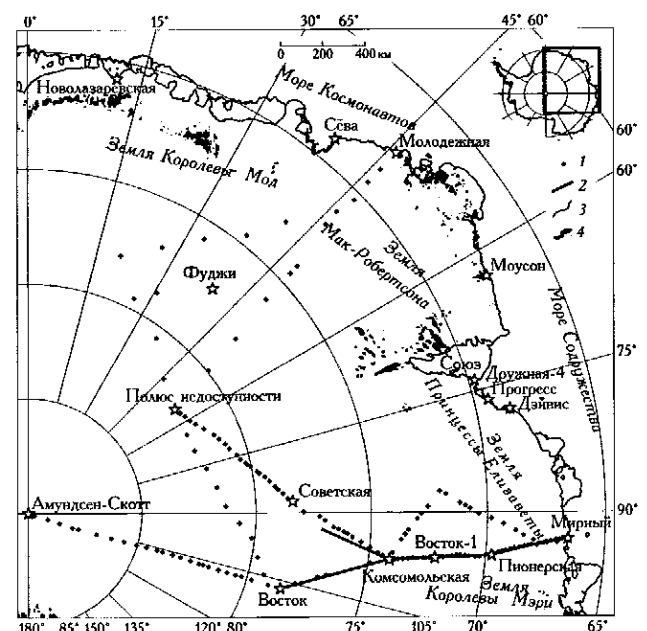


Рис. 1. Схема расположения пунктов и наземных сейсмических и радиолокационных исследований в 1950–80-х годах: 1 — пункты сейсмического зондирования (МОВ); 2 — радиолокационные маршруты; 3 — береговая черта и линия налегания шельфовых ледников (по данным проекта ADD), 4 — горные выходы (по данным проекта ADD)

Fig. 1. Location map of the ground-based seismic measurements and radio-echo sounding in 1950–1980s: 1 — reflection seismic shots; 2 — RES profiles; 3 — Antarctic ice front and grounding line (on ADD); 4 — outcrops (on ADD)

представление о характере подледного рельефа и строении земной коры обширного участка Восточной Антарктиды [9]. К концу 1960-х годов опытно-методические работы по внедрению ледовой радиолокации были завершены. Как показало сравнение результатов сейсмических и радиолокационных измерений толщины ледника между станциями Мирный и Пионерская, расхождение не превышало 7% [37].

В летние сезоны 1966–1968 гг. радиолокационные измерения проводились в районе станции Молодежная [10], а в 1967 г. были выполнены сейсмические работы между Молодежной и Полюсом недоступности [11, 12]. С декабря 1967 г. по март 1968 г. выполнялось наземное радиолокационное зондирование (ледовыми локами с частотами 100, 213 и 440 МГц) на 150 км в глубь континента от станции Молодежной; результаты хорошо соответствовали сейсмическому зондированию [13]. В последующие годы в районе Молодежной изучали вращение плоскости поляризации радиолокационного сигнала [3, 41], скорость распространения электромагнитных волн в леднике [35], а также температуру ледникового покрова на основе радиолокационных данных [36]. С появлением новой техники и компьютерной обработки результатов этот геофизический метод получил широкое распространение [25].

В конце 1970-х годов научные исследования проводились главным образом в центральной части Восточной Антарктиды. В 1978/79 г. (24-я САЭ) и в последующие годы измеряли толщину ледникового покрова и скорости движения льда по маршруту Мирный — Комсомольская — Купол В [43]. Детальные исследования в 1979/80 г. (25-я САЭ) привели к открытию подледниковых водоемов в районе Купола В [4]. Через три года с помощью ледовой локации было выяснено, что скорость течения ледника в этом районе составляет около 1 м/год [43]. Наклонное зондирование, выполненное здесь, позволило определить среднюю скорость распространения электромагнитных волн в леднике, составившую  $165,9 \pm 2,3$  м/мкс [42].

Значимость советских наземных исследований 1950–80-х годов в санно-гусеничных походах трудно переоценить. Помимо данных о подледном рельефе и толщине ледника, была собрана ценная гляциологическая информация [16]. Благодаря маршрутным геофизическим материалам, полученным на заре изучения Антарктиды, было сформировано первое суждение о континенте в целом.

#### Исследования в районе подледникового озера Восток

Обширная территория, простирающаяся от купола Конкордия до гор Принс-Чарльз и от побережья Антарктиды в глубь континента более чем на 1500 км, до сих пор мало изучена. Главными источниками информации о мощности ледникового покрова и подледном рельефе в этом районе продолжают оставаться перечисленные сейсмические и гра-

виметрические измерения 1957–1964 гг. Большой частью их результаты приведены в каталоге [6]. Помимо упомянутых было выполнено еще несколько наземных и авиационных региональных маршрутов Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом и Полярной морской геологоразведочной экспедицией (ПМГРЭ) на Купол В, станции Восток и Мак-Мёрдо в 1980-х годах [22].

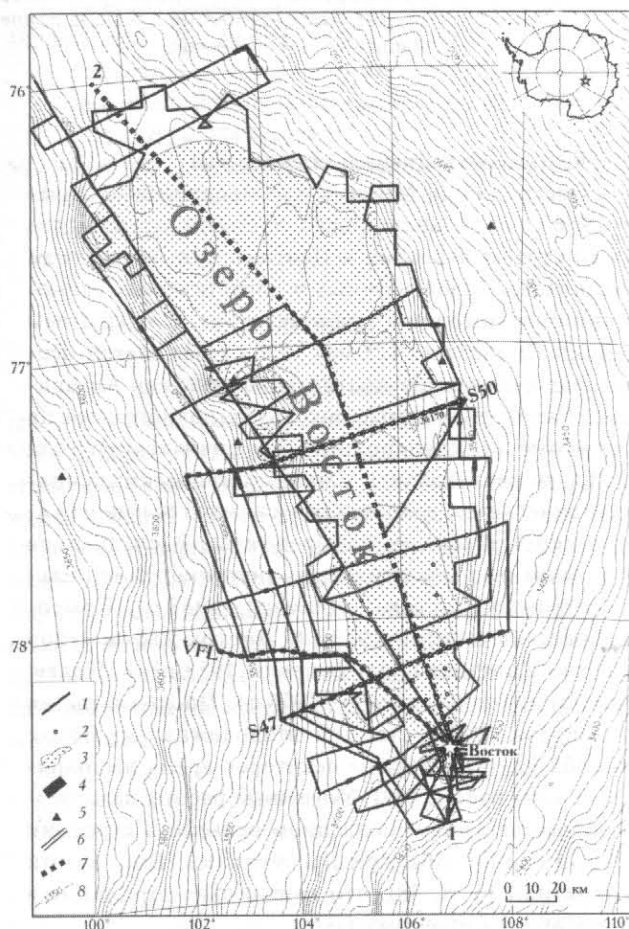


Рис. 2. Отечественные геофизические исследования в районе подледникового озера Восток: 1 — маршруты радиолокационного профилирования; 2 — пункты сейсмического зондирования (МОВ); 3 — наиболее вероятное положение водного зеркала подледникового озера Восток; 4 — фрагменты подледниковых водоемов, выявленных в ходе отечественных исследований; 5 — фрагменты подледниковых водоемов по данным [53]; 6 — трасса следования санно-гусеничного похода; 7 — положение профилей, приводимых на рисунках 5, 6 и в тексте; 8 — изогипсы высот поверхности в метрах по данным [52]; сечение изолиний 5 м

Fig. 2. Russian geophysical investigations in the Lake Vostok area: 1 — Russian RES profiles of 1998-2006; 2 — Russian reflection seismic shots of 1995-2006; 3 — the most reliable shape of Lake Vostok; 4 — subglacial lakes discovered on revised Russian RES data; 5 — subglacial lakes from [53]; 6 — logistic traverse route; 7 — the sections shown in Figures 5 and 6 and in the text; 8 — ice surface elevation contours with 5 m spacing from [52]

Обсудим различия в наземных и авиационных исследованиях. Аэрогеофизические исследования обычно проводятся по регулярной сети маршрутов и охватывают значительную территорию при приемлемой детальности. В течение короткого антарктического лета, приблизительно за один месяц полевых работ при весьма скромном объеме в 100 часов покрывается площадь около 15 тыс. км<sup>2</sup> при среднем масштабном картировании (1:500 000). Одновременно выполняются радиолокационные, магнитометрические и гравиметрические измерения, что приводит к созданию целостной модели глубинного строения земной коры изучаемой территории. Следствие работ по регулярной сети маршрутов — составление достаточно качественных карт машинным способом, поскольку современные компьютерные алгоритмы особенно хорошо «работают» именно с данными такого типа.

Однако имеются и недостатки, из-за чего в последнее время активно обсуждается вопрос об изучении Антарктиды наряду с аэрогеофизическими работами в санно-гусеничных походах. Существуют весьма обширные по своим задачам национальные и международные программы, выполнение которых возможно исключительно с наземных носителей. Это проект ITASE (International Trans-Antarctic Scientific Expedition), объединяющий 20 стран, включая Россию. Предполагаются обширные гляциологические наблюдения вдоль линий тока с отбором проб, измерением скорости движения ледника, плотности льда, керновым бурением. При этом ведется сейсмическое зондирование, радиолокационное профилирование и другие подобные работы. Наземные работы позволяют резко повысить точность и детальность получаемых данных за счет более низкой скорости движения носителя и возможности длительной остановки в любом месте. При подобных исследованиях расстояние между пунктами радиолокационного зондирования составляет около 6 м при точности плановой привязки около 1 м [48]. Еще один аспект применения радиолокационного профилирования — это увеличение олучаемого пространства при высоком положении носителя и соответствующем ослаблении электромагнитных волн [23]. Однако это осложняет (особенно в горных районах) волновое поле и, следовательно, его интерпретацию.

В 1995 г. ПМГРЭ в рамках 41-й Российской Антарктической экспедиции (РАЭ) начала планомерное изучение района подледникового озера Восток с использованием сейсмического зондирования (МОВ), а с 1998 г. (44-я РАЭ) — в комплексе с наземным радиолокационным профилированием. В последующие годы вдоль радиолокационных маршрутов проводились гляциологические наблюдения [29]. В 2005 и 2006 гг. были выполнены исследования вдоль линии тока ледника, проходящей через забой скважины 5Г-1 [40]. Эти работы стали первым шагом на пути к возрождению изучения центральных районов Антарктиды с помощью санно-гусеничных походов.

С 1995 по 2006 г. в районе подледникового озера Восток было выполнено 4530 погонных километров радиолокационного профилирования (рис. 2). В первые полевые сезоны выполнялись опытно-методические работы.

Принципиальная сложность сейсмических работ в центральных районах Антарктиды связана с наличием значительного (100 м и более) снежно-фирнового слоя, в котором затухает акустическая волна. Исследования в санно-гусеничных походах показали, что при продвижении в глубь материка увеличивается интенсивность поверхностных волн-помех. На удалении 150 км от берега она становится соизмеримой с интенсивностью отраженных волн, а на расстоянии более 200 км значительно превосходит их. Здесь границы выделяются неуверенно, а при удалении более 225 км они вообще не были зарегистрированы. Интенсивные поверхностные волны, возникающие после взрыва в снежно-фирновом слое, слабо затухают с расстоянием. Полагают, что для уверенной регистрации целевых границ в центральных районах Антарктиды необходимо возбуждение волн на глубинах более 30 м [9, 14, 15].

Для выполнения планомерных сейсмических работ по изучению подледникового озера Восток указанный метод не применим из-за трудоемкости бурения скважин. Поэтому методические работы были направлены на создание новой методики проведения полевых наблюдений. Они показали, что удовлетворительные результаты достигаются при использовании взрывов 5–6 линий детонирующего шнура длиной 50 м при его расположении на снежной поверхности. Этот способ использовался ПМГРЭ в 1980-х годах при работах на шельфовом леднике Фильхнера–Ронне.

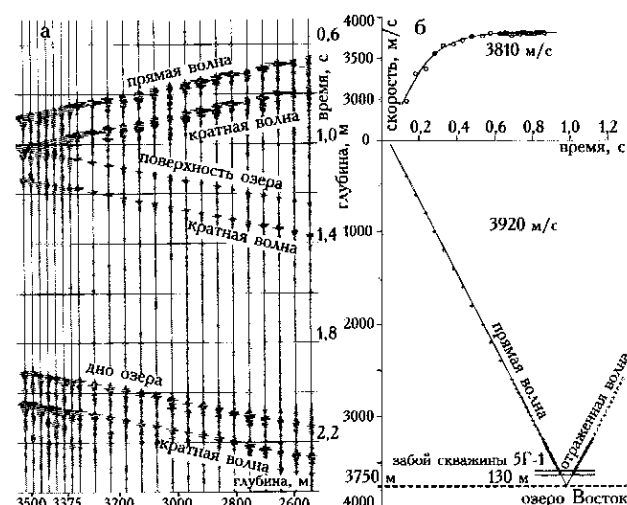


Рис. 3. Сейсмограмма (а) и сводный график средних, пластовых скоростей и вертикального годографа (б) скважины 5Г-1  
Fig. 3. Seismic record (a) and combined graph of the average, strata velocities and vertical time-distance curve (b) of the borehole 5G-1

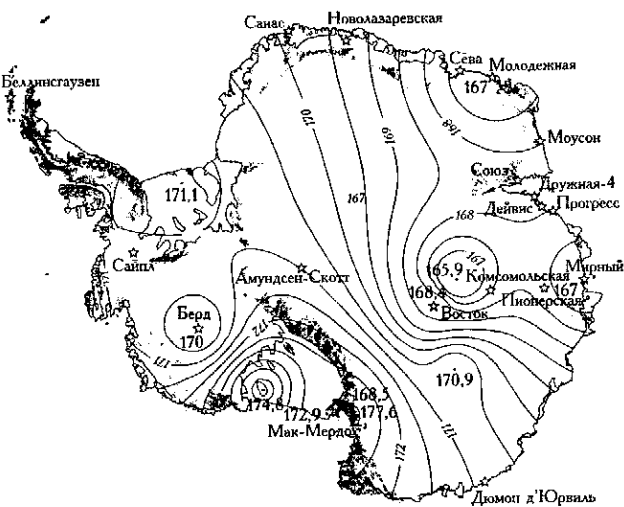


Рис. 4. Скорости распространения электромагнитных волн в теле антарктического ледника  
Fig. 4. Velocities of the radio wave propagation in the Antarctic ice sheet

Следующим результатом методических работ стало вертикальное сейсмическое профилирование в скважине 5Г-1 с целью определения акустических параметров ледника (рис. 3). Измерения показали, что средняя скорость распространения упругих волн в леднике составляет  $3810 \pm 20$  м/с, а скорость в чистом атмосферном льду (пластовая скорость) равна  $3920 \pm 20$  м/с [21, 24, 47, 48]. На основе этих данных была определена толщина ледника от забоя скважины до поверхности озера, которая составила 130 м [21, 24].

Измерения средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике методом наклонного зондирования, выполненные в рамках методических работ, дали ее величину  $168,4 \pm 0,5$  м/мкс [28]. В [51] выполнен обзор литературы и составлена схема распределения средних скоростей распространения электромагнитных волн в Антарктическом ледниковом покрове. Из представленной на рис. 4 схемы следует задача будущих работ в районе Купола В. Согласно полученным данным, здесь имеется ано-

мальная зона со значением скорости  $165,9 \pm 2,3$  м/мкс [42], и, если это действительно так, то в указанном месте следует ожидать каких-то особенностей строения ледника.

Главным результатом сейсморациолокационных исследований стало определение глубин озера Восток. Было выявлено наличие по крайней мере двух бассейнов: глубоководного и мелководного [50]. Первый из них находится непосредственно в районе станции Восток, занимает около трети акватории озера, и его глубины достигают 1500 м. Мелководный бассейн располагается к северу от глубоководного на остальном пространстве. Для него характерны абсолютные глубины от 1100 до 940 м (рис. 5). В пределах глубоководной части выявлен каньон глубиной около 400 м и шириной около 5 км (рис. 6).

Определено положение береговой черты подледникового озера Восток (см. рис. 2), площадь водного зеркала которого равна 17,1 тыс. км<sup>2</sup> [51]. Береговая черта имеет сложную конфигурацию, ее высотное положение изменяется от -800 до -200 м. Выдержанность фрагментов береговой черты свидетельствует об их тектонической предопределенности, что, в свою очередь, указывает на приуроченность котловины озера к глубинному разлому и на ее рифтовое происхождение [18]. Эти выводы подтверждаются данными геофизических исследований [55, 56].

В акватории озера выявлено несколько островов. Один из них, расположенный в юго-западной части, привлекает особое внимание, поскольку находится на линии тока ледника, проходящей через забой скважины 5Г-1 (см. рис. 2). В ее кернах были обнаружены минеральные включения [45], захваченные ледником с указанного острова. В настоящее время они детально изучаются [18].

Радиолокационные исследования выявили многочисленные (предположительно изолированные) подледниковые водоемы вокруг озера Восток (см. рис. 2) с характерными размерами около 5 км на абсолютных высотах от -300 до 800 м [31, 48]. Согласно современным представлениям, основанным на моделировании термодинамических процессов в леднике, донное таяние в этом районе отсутствует [42], т.е. единственной причиной существования подлед-

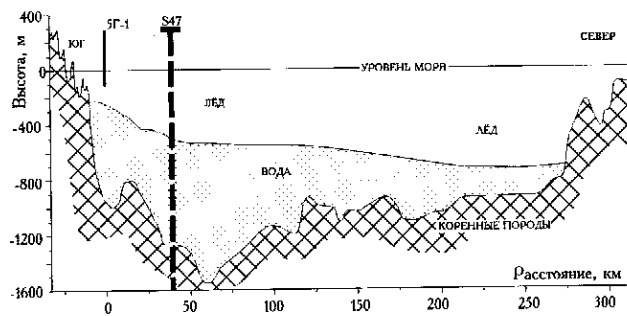


Рис. 5. Разрез ледникового покрова по маршруту 1-2 (положение маршрута см. на рис. 2)  
Fig. 5. Ice base section along 1-2 profile (see location in Fig. 2)

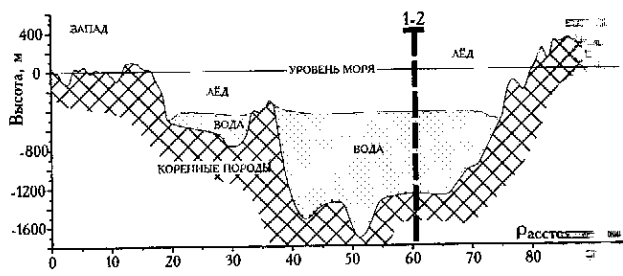


Рис. 6. Разрез ледникового покрова по маршруту S47 (положение маршрута см. на рис. 2)  
Fig. 6. Ice base section along S47 profile (see location in Fig. 2)

никовых водоемов может быть локальное повышение величины геотермального потока, связанное с разломами в земной коре.

В восточной части сейсмо-радиолокационного профиля S50 есть участок, на котором выявлен водный слой (№ 170 на рис. 2). Обращает на себя внимание тот факт, что поверхность водоема имеет ярко выраженную выпуклую форму. Сейсмическое зондирование дважды не подтвердило наличие водного слоя. Кроме того, разница в глубине залегания подошвы ледника, определенная обоими методами, составляет соответственно 200 и 150 м (рис. 7). Обычно расхождение не превышает первых десятков метров. Одно из возможных объяснений, предлагаемое авторами этой статьи, состоит в следующем.

Предположим, что по указанному участку проходит разлом глубинного заложения. Вдоль его оси резко возрастает величина геотермального потока (пунктирная линия на рис. 7в). Как подсказывает логика, изотермы в теле ледника (для случая бесконечно длинной трещины) будут располагаться на образующей эллиптического цилиндра (эллипс потому, что коэффициент теплопроводности коренных пород выше, чем льда; в случае их равенства сечением цилиндра был бы круг). Если верхняя часть разлома подходит достаточно близко к коренной поверхности, вполне возможно начало донного таяния и образование подледникового водоема, который будет иметь форму эллиптического полуцилиндра (см. рис. 7в). При этом слои в теле ледника должны заглубляться примерно так, как зарегистрировано на временном радиолокационном разрезе по маршруту S50 (рис. 8). Подобная ситуация наблюдается в райо-

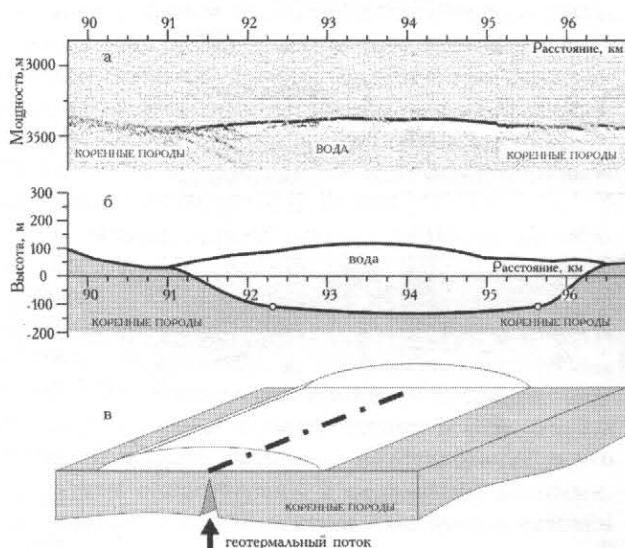


Рис. 7. Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) в районе подледникового водоема № 170, а также модель образования водных линз на подледной поверхности (в). Положение водоема приведено на рис. 2

Fig. 7. Radio-echo time-section (a) and ice base section (b) in vicinity of the subglacial water cavity № 170 and the model of its formation (v). See location in Fig. 2

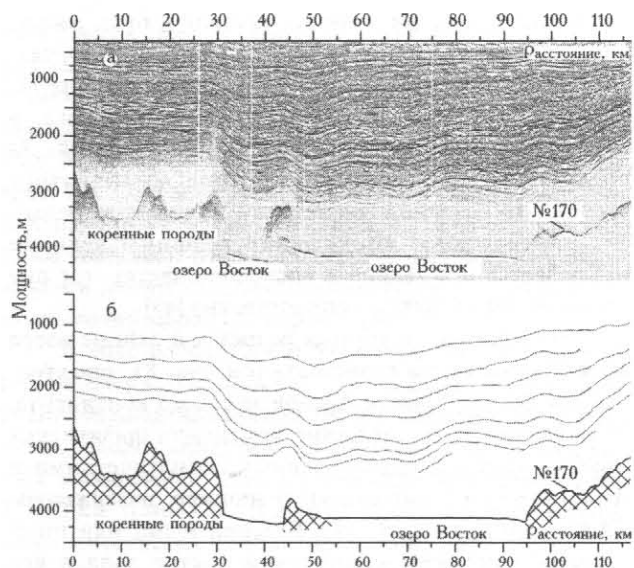


Рис. 8. Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) по маршруту S50. Положение маршрута приведено на рис. 2  
Fig. 8. Radio-echo time-section (a) and ice base section (b) on S50. See location in Fig. 2

нах значительной вулканической активности. Так, в ходе радиолокационных исследований ледника Skaftárkatlar (Исландия) были выявлены подледниковые озера, имеющие сходную форму [57].

Таким образом, если наше предположение верно, то указанный участок пересекается глубинным разломом. Он служит причиной увеличения потока тепла и образования подледникового водоема шириной около 5 км и глубиной до 150 м. Разлом должен быть весьма протяженным — около 150 км. Вероятнее всего, он располагается вдоль восточного борта котловины Восток (от самой южной оконечности озера до его середины). На отдельных локальных участках, вполне возможно, выделяется столько тепла, что окружающее пространство прогревается до температуры 40–60°C, и этого вполне достаточно для жизнедеятельности термофильных бактерий, обнаруженных в керне скважины 5Г-1 [44]. Итак, протяженная структура глубинного заложения, к которой приурочено озеро Восток, вполне может быть активной. Вопрос о том, почему поверхность рассматриваемого подледникового водоема не нашла своего отражения на сейсмических записях, остается открытым и требует дальнейшего осмысления.

А.Н. Саламатин, с которым обсуждалась данная тема, скептически отнесся к возможности столь интенсивного донного таяния. Всецело разделяя его озабоченность, авторы тем не менее не видят пока иного удовлетворительного объяснения указанному феномену, который бы в той же степени соответствовал имеющимся данным.

Толщина ледникового покрова в районе озера Восток изменяется приблизительно от 2460 до 4350 м. Значения более 4200 м зарегистрированы в северной



части озера, а также в местах заливов и бухт, расположенных в северо-западной и западной частях. Подледная поверхность представляется наклонной, осложненной мелкими формами, вызванными, в частности, процессами намерзания — таяния. За пределами озера ледниковый покров заметно утончается, что связано с характером подледного рельефа. Значительное уменьшение толщины ледника наблюдается в западной и восточной частях, где она достигает 2460 и 2600 м, соответственно [48].

На радиолокационных разрезах в районе озера Восток обнаружена слоистость (см. рис. 8), характерная для большей части Антарктического континента. Эта слоистость — следствие изменения физических свойств ледника, обусловленных климатическими и геологическими процессами (например, извержениями вулканов) [20, 49, 54]. Все они в той или иной степени изменяют химический состав льда и его структуру, что в конечном итоге влияет на коэффициент его диэлектрической проницаемости. Это в свою очередь приводит к образованию неоднородностей, которые служат центрами формирования вторичных (отраженных) электромагнитных волн. Были протрассированы четыре внутренние отражающие границы, которые в районе скважины 5Г-1 залегают на глубинах 600, 1060, 1900 и 2180 м, что соответст-



Рис. 9. Схема расположения маршрутов радиолокационного профилирования (1) 2004–2006 гг., 2 — подледниковые водоёмы  
Fig. 9. Radio-echo time-sections of 2004–2006; 1 — RES profiles, 2 — subglacial water bodies

ет возрасту 35, 74, 132 и 160 тыс. лет. На основе указанных данных для района озера Восток были сформированы четыре изохронные поверхности [19, 20]. Это в свою очередь позволило получить информацию, необходимую для подбора параметров модели течения ледника в районе скважины 5Г-1 [40].

Ледник, как известно, — это динамическая система. Он находится в постоянном движении, причем его скорость в общем случае изменяется с глубиной, что приводит к нелинейной деформации изохронных

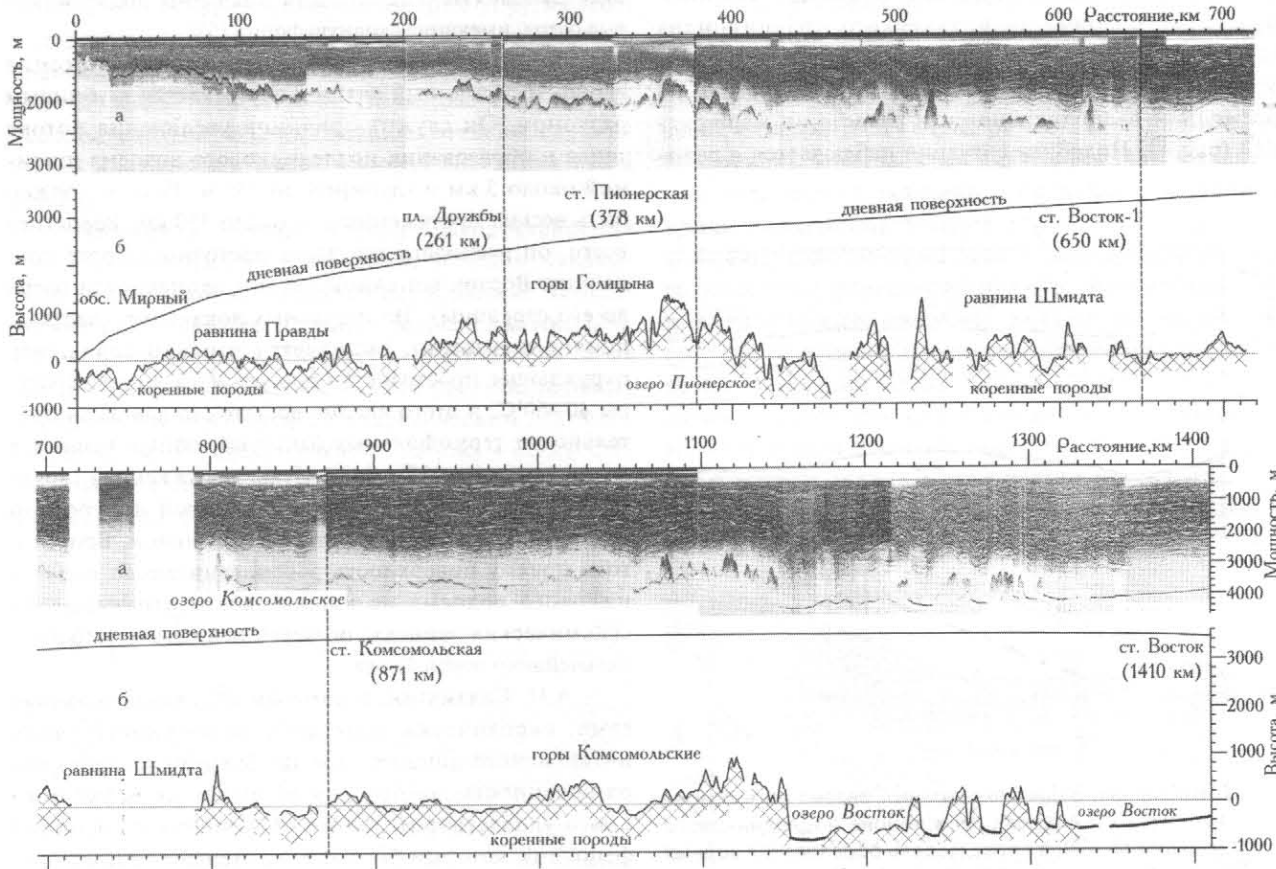


Рис. 10. Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) вдоль трассы Мирный — Восток. Положение маршрута приведено на рис. 9  
Fig. 10. Radio-echo time-section (a) and ice sheet section (b) along the traverse Mirny — Vostok. See location in Fig. 9

поверхностей и существенно усложняет истолкование результатов их анализа. Исключение составляют шельфовые ледники, а также, по аналогии с ними, ледник над акваторией озера Восток. Последний движется как единое целое, и деформации изохронных поверхностей отсутствуют. Такая идея легла в основу изучения характера течения ледника над акваторией озера по морфологии изохронных поверхностей [58]. Сходные исследования были выполнены авторами с использованием профильных данных (а не грида, как поступили американские коллеги [58]), что послужило основой нанесения линии тока ледника в северной части озера Восток.

Сейсморадиолокационные исследования в рассматриваемом районе выявили основные особенности строения котловины Восток и ее бортов. Доминирующая форма этой территории — названная выше котловина субмеридионального простирания, которая подразделяется на глубоководную впадину, озерную равнину и нерасчлененный склон. Глубоководная впадина располагается в южной части котловины Восток на абсолютных высотах от -1600 до -800 м, имеет ярко выраженное субмеридиональное простирание и размеры приблизительно 80×30 км. Озерная равнина выявлена в северной части озера. Она представляет собой субгоризонтальную, вероятно, слабовсхолмленную поверхность протяженностью около 120 км на глубине около 940 м. Нерасчлененный склон окаймляет перечисленные выше орографические формы. Крутизна его склонов изменяется от 8 до 16°, а глубины — приблизительно от -1200 до 300 м. Холмистые возвышенности со всех сторон окружают борта котловины и располагаются главным образом в интервале высот от -150 до 400 м с относительными превышениями от 50 до 200 м. В районе западного и восточного бортов имеются троговые и височные долины. Значительную часть территории за пределами котловины занимают среднегорные массивы с преимущественными высотами от 300 до 1100 м и значительной вертикальной расчлененностью — от 250 до 500 м [17, 50].

Отдельный вопрос связан с наличием придонных осадочных отложений озера Восток. Основная сложность его решения состоит в интерпретации сейсмических материалов: относительно редкая сеть наблюдений приводит к сложностям разделения кратных и боковых волн, а также структурных элементов дна озера и целевых границ. В ходе анализа сейсмограмм было проведено моделирование, и его результаты сопоставлены с реальными данными. Рассмотренные варианты свидетельствуют о наличии относительно маломощного осадочного чехла, что и предполагалось ранее [21].

#### Исследования в полосе трассы Мирный—Восток

В летние полевые сезоны 2004–2006 гг. (49–51-я РАЭ) было выполнено наземное радиолокационное профилирование в полосе трассы следования санно-транспортного похода от обсерватории Мирный к стан-

ции Восток (рис. 9). Вдоль трассы был составлен разрез ледникового покрова (рис. 10), материалы радиолокационного профилирования выявили два фрагмента подледниковых водоемов. Первый из них длиной около 5 км располагается в районе 821-го километра трассы (рис. 11). Он был назван озером Комсомольским, так как находится вблизи станции Комсомольская (на 50 км севернее). Второй подледниковый водоем расположен в районе станции Пионерской и был назван соответственно озером Пионерским [30].

В ходе работ 50-й и 51-й РАЭ был исследован район озера Пионерского: проведена площадная радиолокационная съемка по регулярной сети маршрутов северо-западного простирания с межмаршрутным расстоянием 2 км. Съемка охватила территорию 17×22 км (рис. 12). Толщина ледникового покрова здесь изменяется приблизительно от 1450 до 2450 м. Доминирующая форма подледного рельефа — долина Пионерская (см. рис. 12), дно которой в плане имеет сложную конфигурацию. Восточнее станции размеры долины составляют около 12×9 км, западнее она разделяется на два рукава. Ширина последних изменяется от 1,5 до 3 км. Описываемая структура до конца не исследована, и ее длина не известна. Дно долины располагается преимущественно на высотах от 400 до 500 м, в ее пределах имеется четыре подледниковых водоема, среди которых самый крупный — озеро Пионерское. Степень расчлененности поверхности дна долины крайне слабая, углы наклона не превышают 2°. Исходя из этого, можно предположить, что глубина выявленных озер крайне мала и не превышает нескольких десятков метров. Восточная часть долины Пионерской осложнена куполообразным поднятием размерами 3×3 км с относительной высотой около 200 м. С севера оно граничит с озером Пионерским. Склоны долины крутые, особенно в восточной части, с уклонами более 18°. Северный склон осложнен двумя ярко выраженными площадками на абсолютной высоте около 800 м. Преобладание прямолинейных высокоградиентных участков свидетельствует о тектонической природе долины. Высота ее склонов составляет от 150 (западная часть) до 500 м (восточная часть). С севера и востока к долине примыкают низкогорные массивы с абсолютными высотами от 900 до 1250 м. Перепады



Рис. 11. Временной радиолокационный разрез в районе подледникового озера Комсомольского. Положение водоема приведено на рис. 9

Fig. 11. Radio-echo time-section in the Komsomolskoe subglacial lake vicinity. See location in Fig. 9

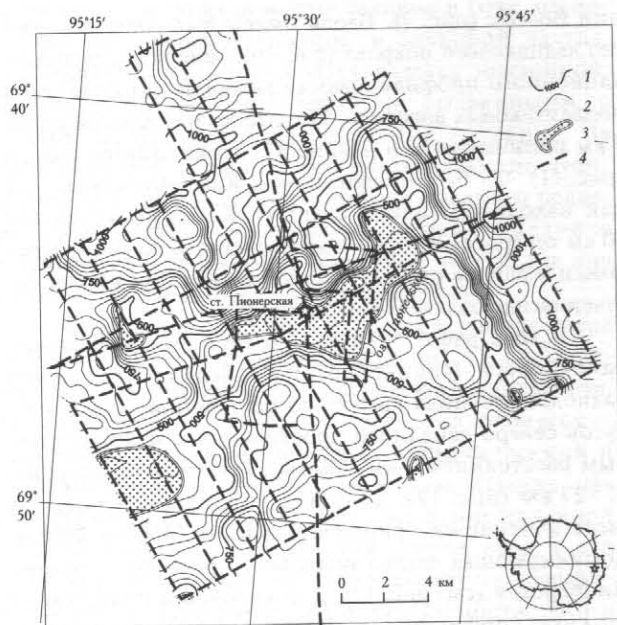


Рис. 12. Положение радиолокационных маршрутов и подледный рельеф в районе станции Пионерской: основные (1) и дополнительные (2) изогипсы подледного рельефа в метрах (сечение 50 м), подледниковые водоемы (3), радиолокационные маршруты (4)

Fig. 12. Radio-echo profiles and ice base of the Pionerskoe subglacial lake area: main (1) and additional (2) ice base contours in meters (ice base contour interval is 50 m); 3 — subglacial water bodies; 4 — RES profiles

высот достигают 100 м, а уклоны  $10^\circ$ . С юга к долине Пионерской примыкает также плосковершинный хребет с абсолютными высотами около 750 м и шириной около 2 км, он выходит за пределы съемки на востоке и западе. Сходная по своей морфологии структура занимает западную часть долины между ее рукавами, имеет широкое простираение и размеры около  $4 \times 2$  км. Южнее и юго-западнее описанного хребта располагаются две долины с двумя частично закартированными подледниковыми водоемами. Дно первой из них слабо расчленено и располагается на высоте около 600 м. Вторая долина пока не закартирована. Плоские вершины положительных форм рельефа свидетельствуют об интенсивной экзарационной деятельности покровного ледника, движущегося здесь со скоростью до 20 м/год [33].

В ходе работ были определены контуры озера Пионерского. Его площадь составляет около  $26,5 \text{ км}^2$  при поперечнике  $9,0 \times 2,5$  км. Выявлено еще четыре подледниковых водоема, два из которых полностью закартированы. Площадь одного из них составляет  $1,2 \text{ км}^2$  с поперечником  $2,0 \times 0,6$  км, второе было выявлено только по одному маршруту. Два других водоема были покрыты съемкой лишь частично. Один из них располагается на западной границе съемки, длина фрагментов на двух маршрутах составляет около 3 км. Второй выявлен на одном маршруте, длина фрагмента составляет около полукилометра (см. рис. 12).

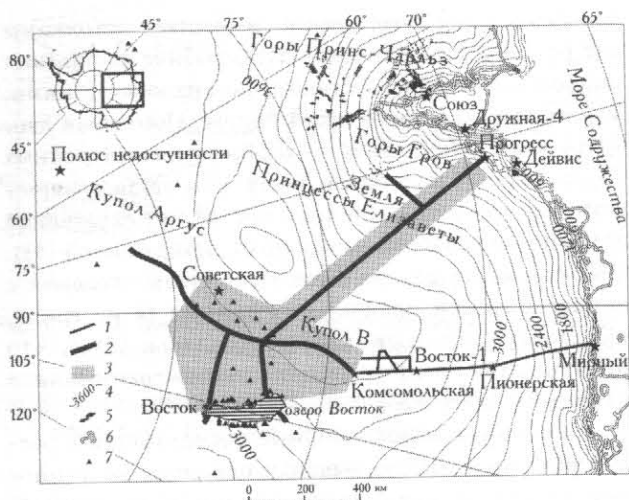


Рис. 13. Положение планируемых наземных сейсмо-гляцио-радиолокационных отечественных исследований в период Международного полярного года 2007–2008 в Центральной Антарктиде: 1 — выполненные региональные маршруты; 2 — планируемые маршруты; 3 — планируемый район работ; 4 — изогипсы ледниковой поверхности в метрах; 5 — выходы горных пород; 6 — береговая черта; 7 — подледниковые водоемы

Fig. 13. Russian glaciological, radio-echo and reflection seismic plans for IPY 2007–2008 in Central Antarctica: 1 — regional RES profiles; 2 — projected profiles; 3 — projected area; 4 — ice surface contours; 5 — outcrops; 6 — ice front; 7 — subglacial water bodies

### Заключение

Среди многочисленных проектов Международного полярного года 2007–2008 имеется направление, посвященное комплексному изучению линий тока антарктического ледника. Особый интерес представляют две из них: одна проходит через забой скважины 5Г-1, другая пересекает северную часть озера Восток. Интерес к работам вдоль линий тока ледника обусловлен тем, что математическое моделирование, основанное на результатах этих исследований, выполняется наиболее простым способом. В этой связи организован научный проект ITASE, посвященный комплексным исследованиям линий тока Антарктиды. Он выполняется по маршруту Купол Тэлос — Купол Конкордия — Восток — Купол Аргус — Купол Фуджи и связывает все основные пункты, в которых проводилось или планируется глубокое керновое бурение ледника. В этом проекте участвует и Россия. Мы планируем работы по означенным линиям тока (рис. 13), как только в строй войдет новая трасса, соединяющая станцию Восток со станцией Прогресс.

### Благодарности

Работа выполнялась в рамках проекта 4-й подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан» при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-05-64967а). Авторы приносят благодарность А.Н. Саламатину за прояснение



вопросов по термодинамике ледникового покрова, В.Я. Липенкову за детальное обсуждение проблем строения ледника, Н.В. Константиновой за конструктивную критику и помощь в написании статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас Антарктики. М. — Л., ГУГК, 1964, 238 с.
2. Богородский В.В., Рудаков В.Н., Тюльпин В.А. Электромагнитное зондирование антарктического ледника. — Журнал технич. физики, т. 25, вып. 6, 1965, с. 1150–1153.
3. Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А. Тензорные электромагнитные свойства глетчерного льда. — Тр. САЭ, т. 295, 1970, с. 120–123.
4. Богородский В.В., Шереметьев А.Н. Подледниковые озера Антарктиды. — Природа, 1981, № 12, с. 49–51.
5. Воронов П.С. Геологическое значение открытия новых гор к югу от горной цепи Принца Чарльза в Восточной Антарктиде. — Бюлл. САЭ, № 5, 1959, с. 15–17.
6. Грушинский Н.П., Корякин Е.Д., Строев П.А. и др. Каталог гравиметрических пунктов Антарктики. — Тр. Гос. астроном. ин-та. т. 42, 1972, с. 115–311.
7. Капица А.П. Новые данные о мощности ледникового покрова центральных районов Антарктиды. — Бюлл. САЭ, № 19, 1960, с. 10–15.
8. Капица А.П. Рельеф ледникового покрова и подледного ложа Антарктиды. — Бюлл. САЭ, № 58, 1966, с. 5–12.
9. Капица А.П., Сорохтин О.Г. Измерения толщины ледникового покрова в походе по маршруту Восток — Молодежная. — Бюлл. САЭ, № 51, 1965, с. 19–23.
10. Кобленц Я.П., Федоров Б.А. Радиолокационные топографические съемки и возможности выявления форм мезорельефа коренной поверхности Антарктиды. — Тр. САЭ, т. 53, 1970, с. 161–171.
11. Коган А.Л. Предварительные данные о сейсмических работах во внутриконтинентальном походе. — Бюлл. САЭ, № 68, 1968, с. 53–56.
12. Коган А.Л. Рельеф ложа ледника и некоторая геологическая характеристика подстилающих пород по маршруту Молодежная — Полюс относительной недоступности. — Бюлл. САЭ, № 70, 1968, с. 7–14.
13. Козлов А.И., Федоров Б.А. Радиолокационное зондирование антарктических ледников летом 1967/68 г. — Бюлл. САЭ, № 71, 1968, с. 53–57.
14. Кондратьев О.К., Гамбурцев А.Г. Сейсмические исследования в прибрежной части Восточной Антарктиды. М., Изд-во АН СССР, 1963, 211 с.
15. Кондратьев О.К., Лопатин С.С., Манилов С.А. Методика и некоторые предварительные результаты сейсмогляциологических исследований в Антарктиде. — Тр. САЭ, т. 10, 1960, с. 37–95.
16. Котляков В.М. Гляциология Антарктиды на рубеже 80-х годов XX в. — Антарктика, вып. 17, 1978, с. 111–124.
17. Ласточкин А.Н., Попов С.В., Попков А.М. Рельеф подледниковой котловины озера Восток (Восточная Антарктида). — Вест. СПбГУ, сер. 7, вып. 3, № 23, 2003, с. 38–50.
18. Лейченков Г.Л., Беляцкий Б.В., Попков А.М., Попов С.В. Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде. — МГИ, вып. 98, 2005, с. 81–91.
19. Мандрикова Д.В., Липенков В.Я., Попов С.В. Строение ледникового покрова в районе озера Восток (Восточная Антарктида) по данным радиолокационного профилирования. — МГИ, вып. 98, 2005, с. 65–72.
20. Мандрикова Д.В., Попов С.В., Липенков В.Я. Корреляция слоистости ледникового покрова по вещественному составу керна и радиолокационным данным в районе скважины 5Г-1 (ст. Восток, Восточная Антарктида). — Тр. XX и XXI Всерос. симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред», вып. 3. СПб., 2003, с. 71–78.
21. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде. — Докл. РАН, т. 379, вып. 5, 2001, с. 680–685.
22. Масолов В.Н., Попов С.В., Хлюпин Н.И. и др. Краткий обзор основных советских (российских) аэро-радиолокационных работ в Антарктиде. — Тр. XVI–XIX Всерос. симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред», вып. 2. СПб., 2002, с. 76–83.
23. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М., «Научный мир», 2006, 392 с.
24. Попков А.М., Веркулич С.Р., Масолов В.Н., Лукин В.В. Сейсмический разрез в районе станции Восток (Антарктида), результаты исследований 1997 года. — МГИ, вып. 86, 1999, с. 152–159.
25. Попов С.В. Применение ледовой локации для гляциологических исследований. — Тр. XX и XXI Всерос. симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред», вып. 3. СПб., 2003, с. 57–64.
26. Попов С.В., Масолов В.Н., Лейченков Г.Л. и др. Проект ABRIS: современные представления о толщинах ледникового покрова и подледном рельефе Восточной Антарктиды в секторе 30–150° в.д. — Симпозиум «Гляциология в канун Международного полярного года», Пушкинские Горы, 9–12 октября 2006 г. Тезисы докладов. М., 2006, с. 13.
27. Попов С.В., Масолов В.Н., Москалевский М.Ю. Новый проект по картированию ледникового покрова и коренного рельефа Антарктиды. — XIII Гляциол. симпозиум «Сокращение гляциосферы: факты и анализ». Тезисы докладов. СПб., 2004, с. 110–111.

28. Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н., Лучининов В.С. Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток. — МГИ, вып. 90, 2001, с. 206–208.
29. Попов С.В., Харитонов В.В., Черноглазов Ю.Б. Плотность и удельная аккумуляция снежного покрова южной части подледникового озера Восток (Восточная Антарктида). — МГИ, вып. 96, 2004, с. 201–206.
30. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида). — МГИ, вып. 100, 2006, с. 165–167.
31. Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н., Лукин В.В. Береговая черта подледникового озера Восток и прилегающие водоемы: интерпретация данных радиолокационного профилирования. — МГИ, вып. 98, 2005, с. 73–80.
32. Саватюгин Л.М., Преображенская А.М. Российские исследования в Антарктике, т. 1. СПб., ГИМИЗ, 1999, 360 с.
33. Саламатин А.Н., Смирнов К.Е., Шереметьев А.Н. Применение математической модели стационарного ледника к расчету термогидродинамических характеристик ледникового покрова Антарктиды в районе от Мирного к куполу В. — МГИ, вып. 44, 1982, с. 39–49.
34. Сорохтин О.Г., Авсюк Ю.Н., Коптеев В.И. Результаты определения мощности ледникового покрова в Восточной Антарктиде. — Бюлл. САЭ, № 11, 1959, с. 9–13.
35. Трепов Г.В. Измерение скорости распространения электромагнитных волн в леднике. — Тр. ААНИИ, т. 295, 1970, с. 60–63.
36. Трепов Г.В. Оценка температуры толщи ледника по данным радиолокационного зондирования. — Бюлл. САЭ, № 79, 1970, с. 53–55.
37. Федоров Б.А. Применение активной радиолокации для изучения антарктических ледников. — Бюлл. САЭ, № 62, 1967, с. 19–24.
38. Фролов А.И., Строев П.А. О подледной впадине на Земле Эндерби. — Бюлл. САЭ, № 58, 1966, с. 20–24.
39. Цукерник В.Б. Новые данные о подледном рельефе центрального сектора Восточной Антарктиды по сейсмогравиметрическим материалам. — Бюлл. САЭ, № 32, 1962, с. 10–14.
40. Цыганова Е.А., Попов С.В., Саламатин А.Н., Липенков В.Я. Моделирование течения льда через станцию Восток на основе данных радиолокационного профилирования. — Симпозиум «Гляциология в канун Международного полярного года», Пушкинские Горы, 9–12 октября 2006 г. Тезисы докладов. М., 2006, с. 8.
41. Чудаков В.И., Шалыгин А.М. Некоторые результаты радиолокационных исследований покровного ледника. — Тр. САЭ, т. 59, 1973, с. 147–152.
42. Шереметьев А.Н. Измерение скорости распространения электромагнитных волн в леднике на Куполе «В» в Антарктиде. — Электрофизические и физико-механические свойства льда. Л., 1989, с. 59–64.
43. Шереметьев А.Н. Измерение толщины и скорости движения ледникового покрова в районе маршрута Мирный — Комсомольская — купол «В». — Тр. САЭ, т. 78, 1986, с. 127–132.
44. Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M. et al. Thermophiles microbe signature in Lake Vostok, Antarctica. — Abstracts of AGU Spring Meeting, Washington, D.C., 2002, p. B21A-04.
45. Jouzel J., Petit J.R., Souchez R. et al. More than 200 meters of lake ice above subglacial Lake Vostok, Antarctica. — Science, v. 286, 1999, p. 2138–2141.
46. Lythe M.B., Vaughan D.G. and BEDMAP Consortium. BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. — Journ. of Geophys. Research, v. 106, № B6, 2002, p. 11,335–11,351.
47. Masolov V.N., Kudryavtzev G.A., Sheremetiev A.N. et al. Earth science studies in the Lake Vostok Region: existing data and proposals for future research. — SCAR Intern. Workshop on Subglacial Lake Exploration. Cambridge, 1999, p. 1–18.
48. Masolov V.N., Popov S.V., Lukin V.V. et al. Russian geophysical studies of Lake Vostok, Central East Antarctica. — Antarctica — Contributions to Global Earth Sciences. Springer, Berlin–Heidelberg–New York, 2006, p. 135–140.
49. Millar D.H.M. Radio-echo layering in polar ice sheets and past volcanic activity. — Nature, v. 292, 1981, p. 441–443.
50. Popov S.V., Lastochkin A.N., Masolov V.N., Popkov A.M. Morphology of the subglacial bed relief of Lake Vostok basin area (Central East Antarctica) based on RES and seismic data. — Antarctica — Contributions to Global Earth Sciences. Springer, Berlin–Heidelberg–New York, 2006, p. 141–146.
51. Popov S.V., Sheremet'ev A.N., Masolov V.N. et al. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica. — Journ. of Glaciology, v. 49, № 165, 2003, p. 179–183.
52. Rémy F., Shaeffer P., Legrésy B. Ice flow physical processes derived from the ERS-1 high-resolution map of the Antarctica and Greenland ice sheets. — Geophys. Journ. Intern., v. 139, 1999, p. 645–656.
53. Siegert M.J., Carter S., Tabacco I. et al. A revised inventory of Antarctic subglacial lakes. — Antarctic Science, v. 17, № 3, 2005, p. 453–460.
54. Siegert M.J., Hodgkins R., Dowdeswell J.A. Internal radio-echo layering at Vostok station, Antarctica, as an independent stratigraphic control on the ice-core record. — Annals of Glaciology, v. 27, 1998, p. 360–364.
55. Studinger M., Bell R., Karner G.D. et al. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica. — Earth Planet. Sci. Letters, v. 205, 2003, p. 195–210.

56. Studinger M., Karner G.D., Bell R. et al. Geophysical models for the tectonic frameworks of the Lake Vostok region, East Antarctica. — *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 216, 2003, p. 663–677.
57. Thorsteinsson T., Gaidos E.J., Gíslason S.R. et al. Glaciological, hydrological, geochemical and biological investigations of the subglacial lakes beneath Skaftárkatlar, Western Vatnajökull, Iceland. — *IGS Intern. Symp. on Earth and Planetary Ice–Volcano Interactions*, Iceland, June 19–23, 2006. Abstracts. Reykjavík, 2006, p. 45A071.
58. Tikku A.A., Bell R.E., Studinger M., Clarke G.K.C. Ice flow field over Lake Vostok, East Antarctica inferred by structure tracking. — *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 227, 2004, p. 249–261.

## SUMMARY

Review of the Russian (Soviet) reflection seismic and ground-based radio-echo sounding (RES) investigations in Central Antarctic is made in the paper. The special attention is given to the scientific works in the regions of Vostok Subglacial Lake (VSL), Pionerskoye Subglacial Lake (PSL) and traverse between Mirny and Vostok stations. Methodic aspects of the reflection seismic works and results of the seismic and RES investigations are discussed. Data on the VSL area layers based on RES materials are represented in the paper. The relationships between subglacial lakes and the deep Earth crust structure are discussed. Radio-echo time section and the ice sheet section are presented. The plans of the ground-based scientific works in the Central Antarctica in the frameworks of IPY are discussed.



## ЗАСЕДАНИЕ РУКОВОДЯЩЕГО КОМИТЕТА ПРОЕКТА «КЛИМАТ И КРИОСФЕРА» (CliC) В 2007 г.

Мы уже писали (МГИ, № 97, с. 232) о создании и работе Руководящего комитета CliC. Он был сформирован в 2000 г., все это время во главе комитета стоял канадский гляциолог, специалист по снежному покрову Барри Гудисон (Barry Goodison). В состав комитета входит около 15 представителей разных стран, в числе которых В.М. Котляков (до конца 2007 г.); Т.Е. Хромова является координатором первого (см. ниже) направления исследований.

Очередное заседание комитета состоялось 19–21 ноября 2007 г. в Женеве, в штаб-квартире Всемирной метеорологической организации (WMO). Обсуждались задачи и форма организации исследований криосферы по четырем направлениям: 1) наземная криосфера и гидрометеорология холодных районов; 2) массы льда и уровень Мирового океана; 3) морская криосфера и климат; 4) глобальный прогноз развития криосферы. Члены комитета, представлявшие крупные страны, рассказали о состоянии исследований криосферы в Южной Америке, Китае, Японии, России. Особое внимание уделено азиатскому CliC, в состав которого входят и исследования, выполняемые в России.

Большая часть исследований по проекту CliC ныне включена в работы по программе Международного полярного года 2007–2008. Поэтому внимание к исследованиям криосферы усилилось, и ряд проектов получил дополнительное финансирование. Криосферные исследования входят в орбиту нескольких проектов МПГ 2007–2008. Руководящий комитет CliC обсудил взаимоотношения со смежными организациями: Всемирной метеорологической организацией (WMO) в целом, Международными комитетами исследований в Арктике и Антарктике (IASC, SCAR), Международным объединением мерзлотоведов (IPA), Международной ассоциации криосферных наук (IACS) и др.

В ближайшие годы, помимо Т.Е. Хромовой, в составе комитета будет работать представитель России директор Главной геофизической обсерватории, специалист по моделированию климата и криосферы В.М. Катцов.