

Проект ABRIS: ледниковый покров и коренной рельеф района куполов Аргус, Конкордия, Титан и Фуджи (Восточная Антарктида)

С.В. Попов¹, В.В. Харитонов¹, В.Н. Масолов¹, Г.Л. Лейченков², В.М. Котляков³,
М.Ю. Москалевский³

¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург (ПМГРЭ)

²Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана, Санкт-Петербург (ВНИИОкеангеология)

³Институт географии РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 17 августа 2007 г.

Представлена членом редколлегии А.Ф. Глазовским

Обсуждаются первые результаты нового проекта ABRIS и приводятся карты мощности ледникового покрова и коренного рельефа обширной территории Восточной Антарктиды.

Введение

В октябре 1996 г. в г. Кембридже (Великобритания) по инициативе рабочей группы по геофизике Научного комитета по исследованиям Антарктики (SCAR) состоялось рабочее совещание, на котором обсуждался вопрос о формировании нового международного проекта «Топография коренного ложа Антарктики» (BEDMAP). Были определены его цели и задачи, сроки и форма представления материала, обсуждены ряд технических и методических вопросов [18]. Всю работу по сбору материала, созданию объединенной базы данных и построению карт взяли на себя специалисты Британской Антарктической службы.

В результате выполнения проекта (BEDMAP) была сформирована база данных, содержащая 1931437 пунктов измерения мощности ледникового покрова по 127 объектам геофизических работ, выполненных в период с 1950-х до середины 1990-х годов: 1924494 (99,64%) пунктов приходится на радиолокационное профилирование (РЛП), 4769 (0,25%) — на сейсмические зондирования и 2168 (0,11%) — на гравиметрические наблюдения и 6 пунктов на бурение (менее 0,01%). В массиве данных РЛП 99,2% (1903763 пунктов) составляют материалы, полученные при аэрогеофизических съемках и 0,8% (20731 пунктов) — в наземных походах [19]. После обработки всех полученных данных были сформированы grids мощности ледникового покрова и коренного рельефа с размером ячеек 5×5 км и на их основе создана и опубликована карта коренного рельефа Антарктики масштаба 1: 10 000 000 [36]. Основные методические приемы обработки данных и построения карт изложены в [37]. Объединение данных исследований разных масштабов и создание единого grida привело к значительной генерализации карт подледного рельефа и мощности ледниковой толщи с потерей информации, а для районов, где

исследования не проводились (например, Земля принцессы Елизаветы и Земля Вильгельма II), — к появлению ложной информации.

Проект ABRIS

В течение 7 лет после завершения проекта BEDMAP в Антарктиде многими странами получены новые радиолокационные и сейсмические данные. С 2000 по 2006 г. российскими экспедициями было выполнено 7 съемок масштаба 1: 500 000 в районе гор Принц-Чарльз (Восточная Антарктида) общей площадью 93 тыс км² [9], а также получено 7274 км наземных радиолокационных наблюдений в районе подледникового озера Восток и в полосе трассы следования санно-гусеничного похода Мирный — Восток [11]. В 1999–2000 гг. итальянские и американские экспедиции провели комплексные исследования в районе озера Восток на площади около 53 тыс. км² [45, 46]. В 2004 г. южная часть гор Принц-Чарльз на площади 81 тыс. км² была изучена в рамках совместного австрало-германского проекта PCMEGA (аэрогеофизическая съемка масштаба 1:500 000) [40]. В последние годы китайской национальной экспедицией выполняются комплексные наземные исследования на участке от холмов Лассемана до купола Аргус (Восточная Антарктида) [24]. В течение летнего полевого сезона 2005/06 г. американскими учеными была выполнена аэрогеофизическая съемка в Западной Антарктиде на территории около 250 тыс. км². Аналогичные работы были проведены на Земле Королевы Мод немецкими специалистами на площади около 200 тыс. км². В рамках Международного полярного года 2007–2008 планируется расширение этого вида работ. С целью усовершенствования карт подледного рельефа и мощности ледникового покрова путем интеграции новых данных, полученных после завершения проекта BEDMAP и построения более детальных карт для

районов, где выполнялись относительно более детальные исследования, недавно был предложен новый проект, получивший название ABRIS (Antarctic Bed Relief and Ice Sheet).

Перед проектом ABRIS были поставлены следующие задачи:

- регулярное пополнение имеющейся базы данных мощности ледникового покрова и подледной топографии Антарктиды;
- формирование комплекта карт мощности ледникового покрова и коренного рельефа на всю Антарктиду, а также на ее отдельные районы в более крупных масштабах (горы Принс-Чарльз, Земля Эндерби, Земля Королевы Мод, озеро Восток) с учетом новых данных и на новой методической основе;
- определение положения линии налегания шельфовых и выводных ледников и их морфометрических характеристик (это направление тесно связано с проектом ADD (Antarctic Digital Database — формирование основных географических объектов Антарктиды на основе технологии ГИС) [23]; полученная в ходе работы информация может быть внедрена в него в качестве отдельных слоев;
- создание карт геоморфологического, морфометрического, гляциологического и геологического содержания;
- издание комплекта; создание страницы в интернете.

Указанные задачи согласуются с задачами проектов МПГ 2007–2008 ASAID (Изучение аккумуляции и стока Антарктического ледникового покрова), TEMPORE (Тектонические карты полярных областей Земли) и ITASE (Изучение линий тока антарктического ледникового покрова).

Использованные материалы

Первым результатом проекта ABRIS стали карты мощности ледникового покрова и коренного рельефа центральной части Восточной Антарктиды, включающей куполá Фуджи, Конкордия, Аргус и ледораздел В (рис. 1). Они были представлены на симпозиуме «Гляциология в канун Международного полярного года» [10] и обсуждаются в настоящей работе. На этой территории расположены несколько примечательных географических объектов — горы Гамбурцева, подледниковое озеро Восток, крупные подледниковые озера в районе станции Советская [21] и многочисленные мелкие подледниковые водоемы.

В районе, который был объектом настоящих исследований, выполнены многочисленные радиолокационные и сейсмические наблюдения. Отечественные работы представлены данными трех типов: пунктами сейсмического зондирования методом отраженных волн (МОВ), наземными РЛП и воздушными РЛП. Сейсмические зондирования МОВ проводились с 1958 по 1964 г. и с 1995 по 2006 г. В работах раннего периода использовалась 24-канальная сейсмическая станция, а привязка

выполнялась астрономическим способом [1, 2, 3, 16, 17]. В современных исследованиях применялась как аналоговая, так и цифровая 24-канальные сейсмические станции, а плановая привязка выполнялась по GPS [7, 11, 38].

Данные аэрорадиолокационного профилирования были получены в сезоны 1966/67 и 1987–1991 гг. Работы в 1966/67 г. выполнялись по регулярной сети маршрутов субмеридионального простирания с межмаршрутным расстоянием около 50 км. В качестве носителя использовался самолет Ил-14. В исследованиях применялся ледовый локатор с частотой зондирующих импульсов 213 МГц [4].

В ходе полевых работ 1987–1991 гг. в центральной части Восточной Антарктиды были выполнены комплексные аэрогеофизические исследования с борта самолета Ил-18Д масштаба 1:5 000 000. В исследованиях 1987/88 г. плановая привязка обеспечивалась применением аппаратуры ДИСС-013 (доплеровский измеритель скорости и угла сноса) и радиогеодезической системой дальней навигации РСДН «СВОД». Погрешность определения координат оценивалась в 4,7 км. Начиная с 1988 г. в практику работ начали внедряться спутниковые навигационные системы типа СНС «ТРАНЗИТ». Это привело к существенному уменьшению погрешности плановой привязки, которая для этих исследований составила около 150 м и менее 100 м в последующие полевые сезоны. В указанный период были выполнены три маршрута: АМЦ Молодежная — станция Восток (1987 г.), АМЦ Молодежная — станция Мак-Мердо и станция Мак-Мёрдо — АМЦ Молодежная (1990 г.). В работах использовались ледовые локаторы МПИ60 и ЛЛ5000 с частотой зондирующих импульсов 60 МГц [13].

В наземном РЛП 1998–2006 гг., выполненном в районе озера Восток и в полосе маршрута обсерватория Мирный — станция Восток применялся ледовый локатор РЛС6098 с частотой зондирующих импульсов 60 МГц. Для плановой привязки использовали GPS [7, 11, 14, 15, 38].

При составлении карт были использованы также материалы зарубежных экспедиций, полученные из базы данных проекта BEDMAP. К ним относятся: 1) данные наземных сейсмических исследований США, выполненные в 1960-х годах (плановая привязка пунктов наблюдения проведена астрономическим способом [20, 25]); 2) материалы совместных аэрогеофизических исследований США, Великобритании и Дании, выполненных в течение летних полевых сезонов 1971/72, 1974/75 и 1978 гг. на Земле Виктории и в центральной части Восточной Антарктиды (работы выполнялись на базе самолета C-130 Hercules с использованием ледового локатора SPRI Mark 4 с частотой зондирующих импульсов 60 МГц; точность плановой привязки составила около 3 км [19, 28, 29, 30]); импульсов 60 МГц; точность плановой привязки составила около 3 км [19, 28, 29, 30]); 3) материалы японских наземных радио-

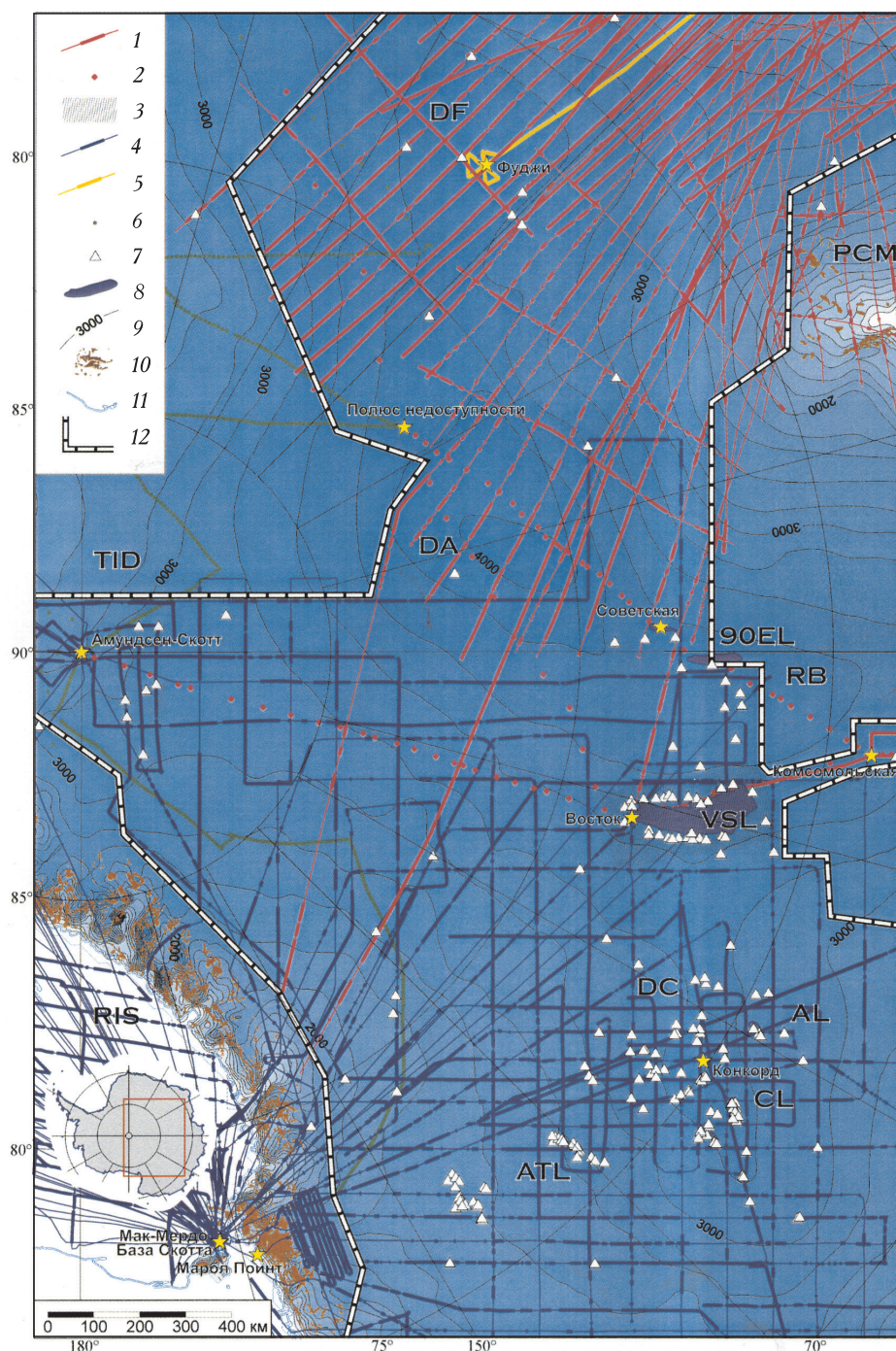


Рис. 1. Схема использованных материалов при составлении карт. Отечественные данные: 1 — наземные и авиарадиолокационные маршруты; 2 — пункты сейсмических зондирований МОВ; 3 — район детальных наземных исследований; 4 — аэро-радиолокационные маршруты англо-американской экспедиции; 5 — японские наземные радиолокационные маршруты; 6 — американские пункты наземных сейсмогравиметрических измерений; подледниковые водоёмы [11, 43]; 7 — не выраженные в масштабе карты; 8 — имеющие значительные размеры; 9 — изогипсы высот дневной поверхности в метрах, сечение изолиний 200 м; 10 — горные выходы по данным проекта ADD; 11 — береговая черта и линия налегания шельфовых ледников по данным проекта ADD; 12 — граница карт. Тонкой линией показано положение радиолокационных маршрутов, утолщенной информативные участки. 90EL — подледниковое озеро 90° в.д.; AL — подледниковое озеро Аврора; ATL — подледниковое озеро Адвенче Тренч; CL — подледниковое озеро Конкордия; DA — Купол Аргус; DC — Купол Конкордия; DF — Купол Фуджи; PCM — горы Принс-Чарльз; RB — ледораздел В; RIS — шельфовый ледник Ронне; TID — Купол Титан; VSL — подледниковое озеро Восток

Fig. 1. Scheme of materials used for map compilation. Russian data: 1 — RES routes; 2 — reflection seismic shots; 3 — area of detailed studies; 4 — British-American RES routes; 5 — Japanese ground-based RES routes; 6 — American seismic and gravity measurements; subglacial lakes [11, 43]; 7 — relative small; 8 — big ones; 9 — surface elevation contours spaced with 200 m; 10 — outcrops on ADD; 11 — ice front and grounding line on ADD; 12 — the maps boundaries. Thin lines is the RES routes, thick lines is the RES reflections. 90EL — 90E Subglacial Lake; AL — Aurora Subglacial Lake; ATL — Adventure Trench Subglacial Lake; CL — Concordia Lake; DA — Argus Dome; DC — Concordia Dome; DF — Fuji Dome; PCM — Prince Charles Mountains; RB — Ridge B; RIS — Ronne Ice Shelf; TID — Titan Dome; VSL — Vostok Subglacial Lake

локационных исследований, выполненных в районе купола Фуджи в 1992–1994 гг. (применялся ледовый лоатор с частотой зондирующих импульсов 60 МГц; плановая привязка обеспечивалась аппаратурой JMR 4A, основанной на методе Допплера [19]).

Положение радиолокационных маршрутов и пунктов сейсмических зондирований приведено на рис. 1.

Методические аспекты гридирования

Проблема адекватности отображения геофизической информации посредством карт изолиний имеет давнюю историю. Существо вопроса заключается в том, что с появлением вычислительной техники указанное преобразование проводится достаточно формальным образом. Практически это достигается путем формирования прямоугольной матрицы (грида), которая заполняется некоторыми эффективными значениями. Подобное представление удобно по ряду причин. Грид — это целостная математическая модель того параметра, который мы изучаем, будь то мощность ледникового покрова, подледная топография, магнитные поля или что-то иное. Матричная форма представления позволяет эффективно использовать современный математический аппарат, поскольку постоянство шага по вертикальной и горизонтальной осям существенно упрощает уравнения. Применение же различного рода транс-

формаций оказывает существенную помощь при анализе полученных результатов.

Любой грид — это продукт генерализации исходных данных, при котором неминуемы потери локальных особенностей изучаемого параметра. Они тем выше, чем больше расстояние между узлами грида. Именно поэтому, например, при составлении даже среднемасштабных геоморфологических карт предпочтительнее использовать именно маршрутные данные [5, 6]. Теоретически можно сформировать грид без потери информации. Для этого необходимо выбрать расстояние между его узлами, сравнимое со средним расстоянием между пунктами наблюдений. Однако измерения распределены по территории работ крайне неравномерно: расстояния между ними вдоль маршрутов существенно меньше, чем межмаршрутное расстояние. Методика обработки аналоговых радиолокационных материалов предполагает оцифровку временных радиолокационных разрезов с интервалом 5 с [8]. Применительно к обсуждаемым региональным работам это соответствует приблизительно 600 м, или около 1,2% по отношению к межмаршрутному расстоянию. Указанная ситуация приводит к тому, что при формировании грида с расстоянием между узлами порядка расстояния между пунктами измерений нарушается корреляционная связь между маршрутными данными, что, в свою очередь, приводит к нарушению целостности модели. Поэтому выбор параметров грида обусловлен компромиссом между точностными характеристиками карты и степенью корреляции между маршрутными данными. Первая величина выражается численно, в то время как последняя оценивается визуально.

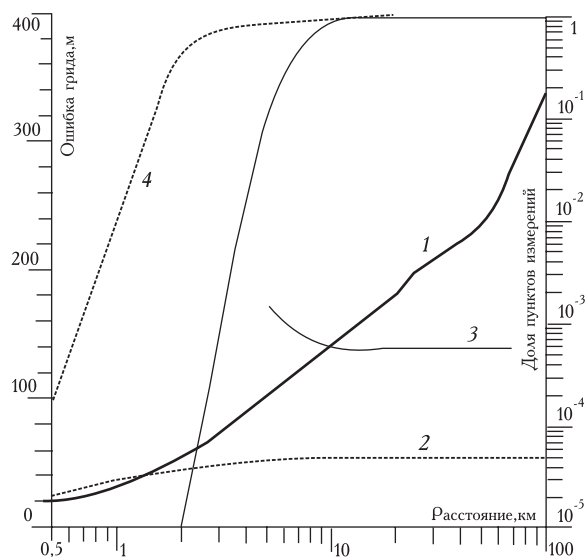


Рис. 2. Зависимость ошибки грида и доли пунктов измерений от расстояния. 1 — зависимость ошибки грида от расстояния между узлами; зависимость ошибки грида от радиуса осреднения: 2 — с размером ячейки 2×2 км; 3 — с размером ячейки 10×10 км; зависимость доли пунктов измерений от радиуса осреднения: 4 — для грида с размером ячейки 2×2 км; 5 — для грида с размером ячейки 10×10 км

Fig. 2. Dependence grid errors and proportion of observation points on the distance. 1 — grid error on the grid spacing; grid error on the search radius: 2 — for cells 2×2 km; 3 — for cells 10×10 km; proportion on the search radius: 4 — for cells 2×2 km; 5 — for cells 10×10 km

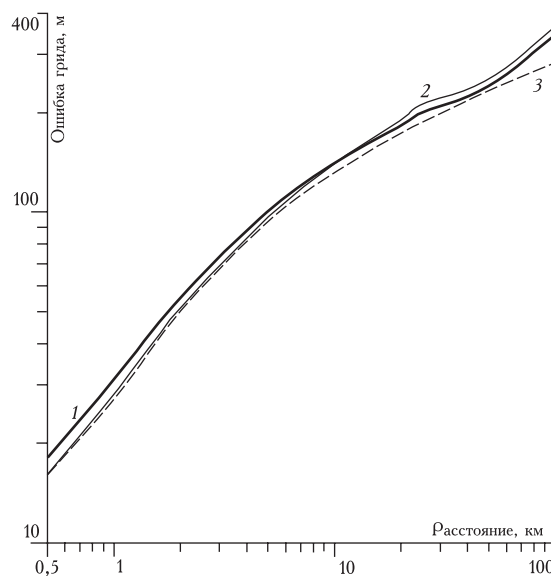


Рис. 3. Зависимость ошибки грида от расстояния между его узлами. Вычисления выполнены для гридов, сформированных методами: 1 — Inverse distances; 2 — Kriging; 3 — Minimum Curvature

Fig. 3. Dependence grid error on the grid spacing. Algorithm: 1 — inverse distances; 2 — kriging; 3 — minimum curvature

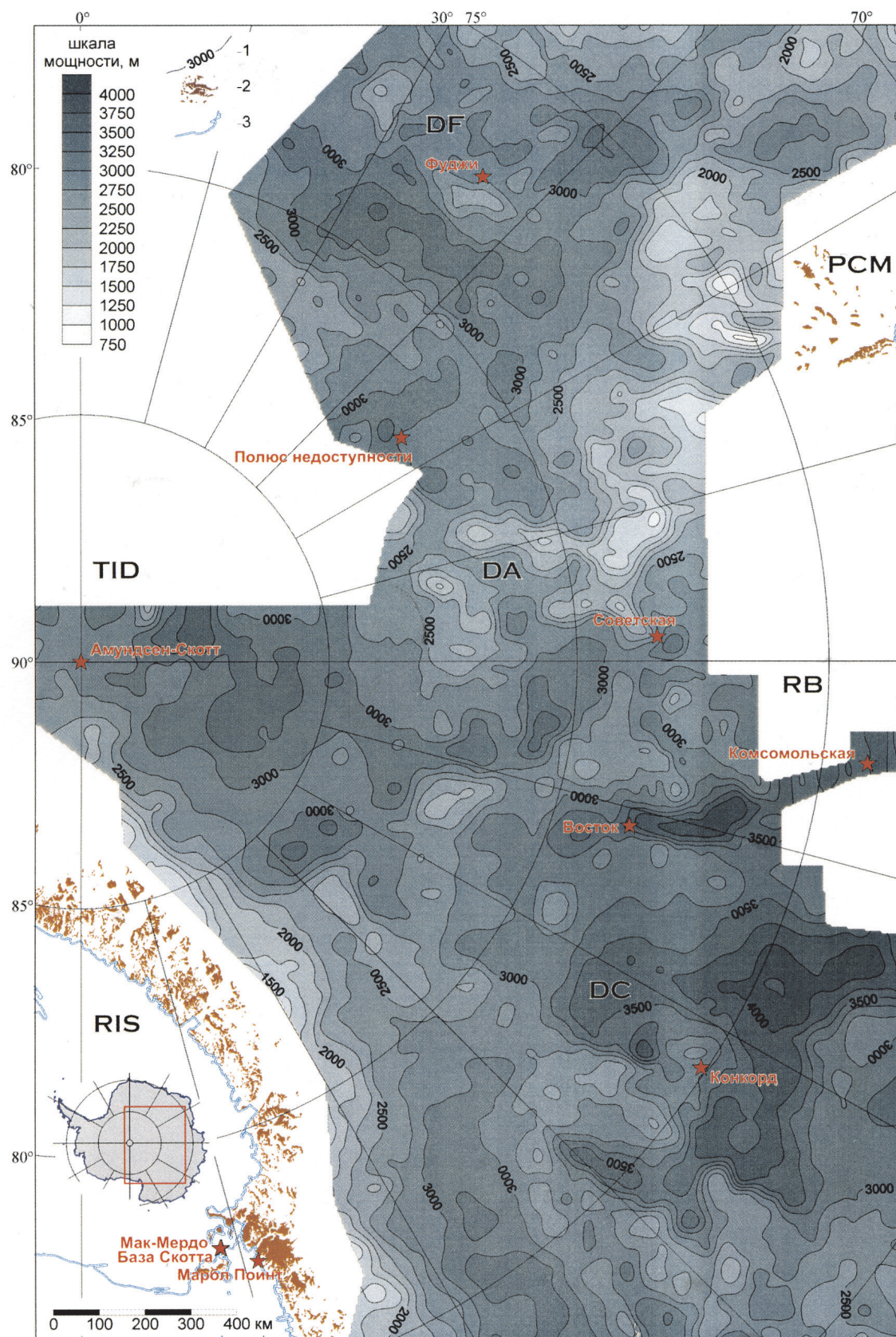


Рис. 4. Карта мощности ледникового покрова. 1 — изопакиты ледникового покрова в метрах; сечение изолиний 250 м; 2 — горные выходы по данным проекта ADD; 3 — береговая черта и линия налегания шельфовых ледников по данным проекта ADD. DA — Купол Аргус; DC — Купол Конкордия; DF — Купол Фуджи; PCM — горы Принс-Чарльз; RB — ледораздел В; RIS — шельфовый ледник Ронне; TID — Купол Титан

Fig. 4. Ice thickness map. 1 — ice thickness contours spaced with 250 m; 2 — outcrops on ADD; 3 — ice front and grounding line on ADD. DA — Argus Dome; DC — Concordia Dome; DF — Fuji Dome; PCM — Prince Charles Mountains; RB — Ridge B; RIS — Ronne Ice Shelf; TID — Titan Dome

Мерой точности карты является ошибка грида σ_G , равная стандартному отклонению разности N реальных измерений z_i от грида \tilde{z}_i :

$$\sigma_G^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (z_i - \tilde{z}_i)^2.$$

На рис. 2 приведены результаты анализа гридов мощности ледника, сформированных методом Inverse Distance [31] при разных параметрах. При построениях использовались материалы, представленные на рис. 1. Гридирование выполнялось с применением программы Surfer 8 (Golden Software Inc.). На кривой 1 показана зависимость между σ_G и расстоянием между узлами грида D_G , который сформирован при радиусе осреднения $R_G = 80$ км. Увеличение D_G приводит к большей генерализации карты, а, следовательно, и к менее детальному описанию ее локальных особенностей вдоль маршрута (но к более достоверному описанию территории между ними). Это и служит причиной возрастания отклонения измерений от грида. Кривые 2 и 3 отражают зависимость между σ_G и радиусом осреднения. Расстояния между узлами грида составляют 2 км и 10 км, соответственно. Как следует из рисунка, при $R_G \approx D_G$ происходит насыщение, и σ_G перестает изменяться. Это связано с тем, что значения в узлах грида формируются на основе данных с учетом весового коэффициента. Он обратно пропорционален квадрату расстояния между узлом и пунктом измерения [31]. Это приводит к тому, что вклад от далеких точек практически не влияет на конечный результат, что и наблюдается на рисунке как участок насыщения кривых 2 и 3. При $R_G > D_G$ в формировании грида участвуют практически все пункты измерений. При $R_G < D_G$ по вполне понятным причинам появляются данные, не вовлеченные в процесс гридирования. В качестве иллюстрации изложенного приведена зависимость доли пунктов измерений от радиуса осреднения (кривые 4 и 5).

С уменьшением R_G ошибка грида может либо уменьшаться (кривая 2), либо увеличиваться (кривая 3). При D_G сравнимом со средним расстоянием между пунктами измерений \bar{d} , σ_G уменьшится, так как используемые данные концентрируются вблизи узлов грида (кривая 2). Если $D_G \gg \bar{d}$, это приведет к тому, что в формирование узлов будут вовлечены удаленные (на расстояние порядка R_G) пункты измерений (просто потому, что других не имеется). В частности, при создании грида с размером ячеек 10×10 км при радиусе осреднения 2 км был использован всего один пункт измерения, в то время как грид 2×2 км (при том же радиусе осреднения) строился по 54840 пунктам, что составляет 46% их общего количества.

Приведенные выше построения выполнялись по методике Inverse Distance. Однако это не единственный алгоритм гридирования. В последней версии наиболее популярной программы картосоставления Surfer 8 (Golden Software Inc.) их двенадцать. Однако тех, которые объективно дают наилучший результат

при обработке геофизических данных, всего четыре: Kriging [26, 33, 34, 39], Inverse Distance [31], Minimum Curvature [22, 44] и Triangulation [27, 32, 35, 42], причем последний, как показывает опыт, следует использовать при относительно равномерном распределении измерений по территории. Гриды, формируемые оставшимися тремя методами, характеризуются примерно одинаковыми значениями σ_G . На рис. 3 представлены зависимости ошибки грида от расстояния между его узлами для указанных алгоритмов. Во всех случаях радиус осреднения был выбран равным 80 км. Как следует из рисунка, наиболее точно фактуру отражают гриды, сформированные посредством алгоритма Minimum Curvature (кривая 1). Величины ошибки гридов, построенные методами Kriging (кривая 2) и Inverse Distance (кривая 3) примерно одинаковые, но худшие, по сравнению с вышеназванными.

Помимо статистических характеристик, необходимо принимать во внимание «правдоподобность» окончательного результата. Составленная карта не должна вводить в заблуждение необоснованной детальностью (например, наличием недостоверных аномалий), угловатостью изолиний или их конфигурацией. Именно по этой причине были выбраны вышеназванные четыре алгоритма гридирования. Для придания изолиниям плавности было выполнено сглаживание (при этом, естественно, σ_G увеличилась). Эта процедура практически не сказывается на субгоризонтальных участках, в то время как для высокоградиентных областей может привести к значительным изменениям. Для их минимизации между узлами грида методом интерполяции сформированы дополнительные узлы и лишь потом выполнено сглаживание. Использование метода Inverse Distance в нашем случае, в окончательном варианте (после сгла-

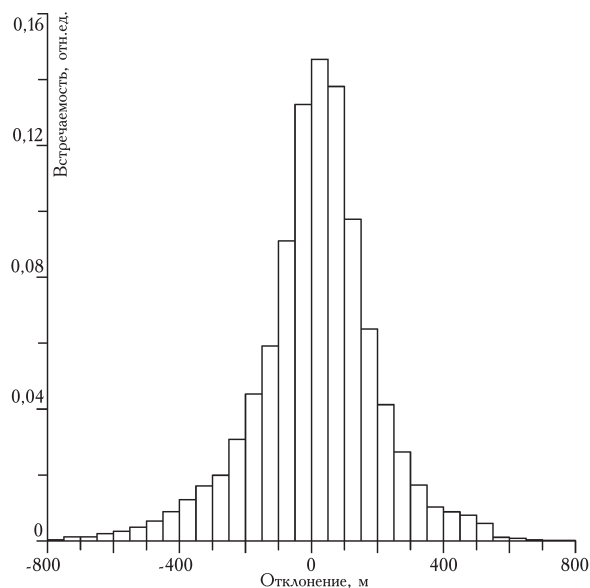


Рис. 5. Гистограмма отклонений измеренных значений мощности ледника от грида

Fig. 5. Histogram of the differences between the data and the ice thickness grid

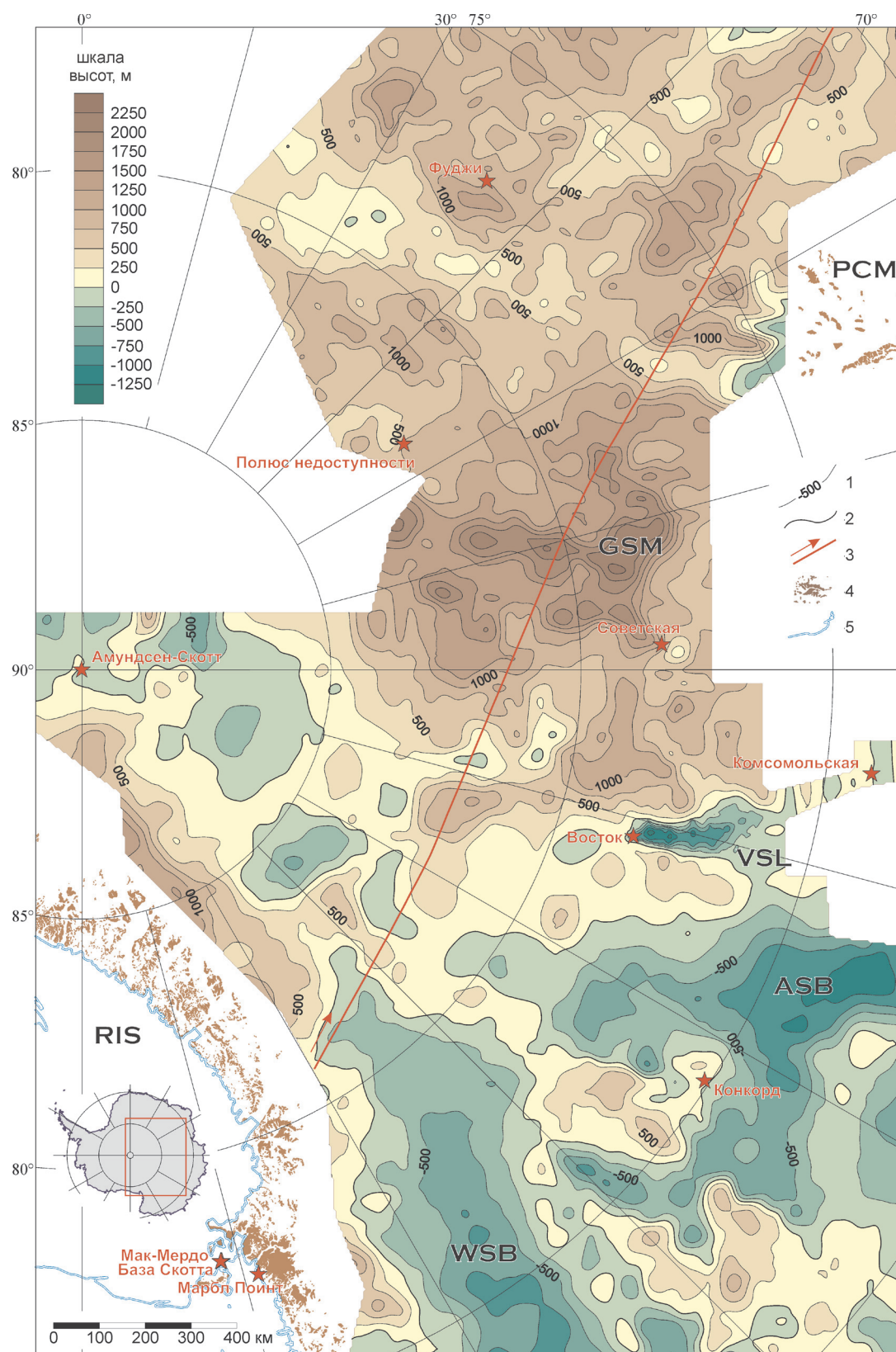


Рис. 6. Карта коренного рельефа. 1 — изогипсы коренного рельефа, (м); сечение изолиний 250 м; 2 — уровень моря; 3 — положение маршрута М-1509 и его направление; 4 — горные выходы по данным проекта ADD; 5 — береговая черта и линия налегания шельфовых ледников по данным проекта ADD. ASB — подледниковый бассейн Аврора; GSM — подледные горы Гамбурцева; PCM — горы Принс-Чарльз; RIS — шельфовый ледник Ронне; VSL — подледниковое озеро Восток; WSB — подледниковый бассейн Уилкса

Fig. 6. Bedrock map. 1 — bedrock contours spaced with 250 m; 2 — sea level; 3 — M-1509 route and its direction; 4 — outcrops on ADD; 5 — ice front and grounding line on ADD. ASB — Aurora Subglacial Basin; GSM — Gamburtsev Subglacial Mountains; PCM — Prince Charles Mountains; RIS — Ronne Ice Shelf; VSL — Vostok Subglacial Lake; WSB — Wilkes Subglacial Basin

живания) привело к формированию не только наиболее «правдоподобного», но и более точного грида.

На рис. 4 приведена карта мощности ледникового покрова. Она построена методом Inverse Distance с размером ячеек грида 5×5 км и радиусом осреднения 80 км. Точность карты составляет 188 м. На рис. 5 представлена гистограмма отклонений измеренных значений от грида. Она показывает, что отклонения измеренных значений от модели в целом соответствуют нормальному распределению.

На рис. 6 приведена карта коренного рельефа. Она сформирована как разность между дневной поверхностью и мощностью ледникового покрова с учетом данных по батиметрии подледникового озера Восток [38]. Для составления грида дневной поверхности (см. рис. 1) были использованы материалы международного проекта GTOPO30, доступные по адресу <ftp://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/gtopo30/antarctica>.

Анализ ошибок гридирования

С целью объективной оценки степени генерализации составленных карт проведено сравнение исходных данных с гридом. На рис. 7 представлен профиль подледной поверхности по региональному маршруту М-1509, выполненному в сезон 1990/91 г. между станцией Мак-Мёрдо и АМЦ Молодежная. Его положение показано на рис. 6. Сравнение проведено по подледной поверхности, а не по мощности ледника из соображений наглядности. Точностные характеристики этих гридов примерно одинаковы, поскольку данные по дневной поверхности существенно лучше.

Профиль показывает, что сформированный грид в достаточной степени описывает генеральные формы подледной поверхности. Как указывалось выше, трудно ожидать от карты, созданной на основе съемок регионального масштаба, точного описания локальных особенностей рельефа. Эта задача решается путем проведения более детальных геофизических исследований. Отклонения измерений от модельной поверхности в восточной части профиля М-1509 заметно меньше, чем в центральной и западной. Это обусловлено степенью расчлененности коренного рельефа. Наибольшие вариации подледной поверхности по маршруту наблюдаются в районе гор Гамбурцева и гор Принс-Чарльз. Это привело к тому, что при сглаживании именно на этом участке и возникли наибольшие ошибки отображения рельефа на карте проекта BEDMAP.

Значение ошибки грида, равно как и гистограмма отклонений измеренных значений от сформированной модели, — это интегральные понятия. Они характеризуют точность построения карты подледного рельефа. Однако для анализа полученного результата важно знать распределение отклонений измеренных значений от грида. Это позволяет локализовать ошибки и выявить их причины. С этой целью была составлена схема отклонений измеренных значений от грида (рис. 8). Она показывает, что большая часть

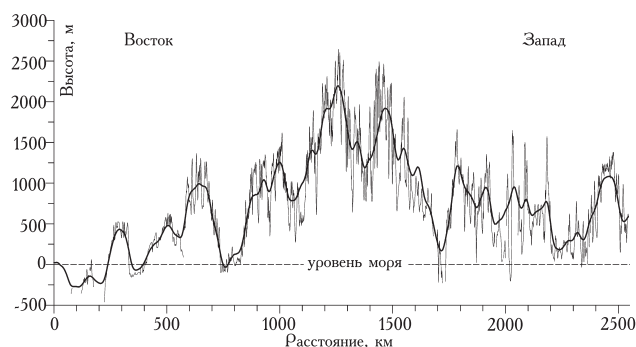


Рис. 7. Профили подледной поверхности по маршруту М-1509. Тонкой линией показан профиль, построенный на основе натуральных измерений, утолщенной — в результате гридирования

Fig. 7. Ice base profile along the M-1509. Thin line is the measured data; thick line is the interpolation from the grid

территории характеризуется отклонениями до 100 м. Имеются три участка со значительными ошибками. К ним относятся район озера Восток, территория, расположенная к югу от гор Принс-Чарльз, и локальная аномалия, на юго-западе от купола Конкордия.

Первые два указанных района характеризуются повышенной степенью расчлененности подледной поверхности. Для склоновой части котловины Восток, где и сосредоточены наибольшие отклонения, характерны уклоны 200–300 м/км [41]. В южной части гор Принс-Чарльз также имеются значительные перепады высот подледной поверхности [12, 40]. Поскольку при сглаживании наибольшие изменения происходят на высокоградиентных участках, т.е. в районах значительных перепадов высот, становится понятной и причина увеличения ошибки.

Необходимо отметить следующее. Казалось бы, локальное применение сглаживания (например, за исключением района озера Восток и южной части гор Принс-Чарльз, где имеется сгущение сети наблюдений) даст лучший результат как по величине ошибки грида, так и по конфигурации изолиний. Однако при этом визуально будет казаться, что указанные районы более расчленены, чем остальная территория, что неверно и вводит в заблуждение читателя. Приведенный на рис. 7 профиль подледной поверхности показывает, что ее реальные уклоны в районе гор Гамбурцева и Принс-Чарльз примерно такие же, как и в районе озера Восток. Отсюда следует, что во избежание искажений, все участки карты, независимо от сети наблюдений, должны гридироваться и сглаживаться одинаково.

Локальная аномалия, расположенная к юго-западу от купола Конкордия (см. рис. 8), выявляется только по одному профилю и вполне может оказаться ошибочной. Поэтому она была снивелирована до появления дополнительной информации.

Заключение

В рамках проведенного исследования выработана оптимальная методика генерализации данных

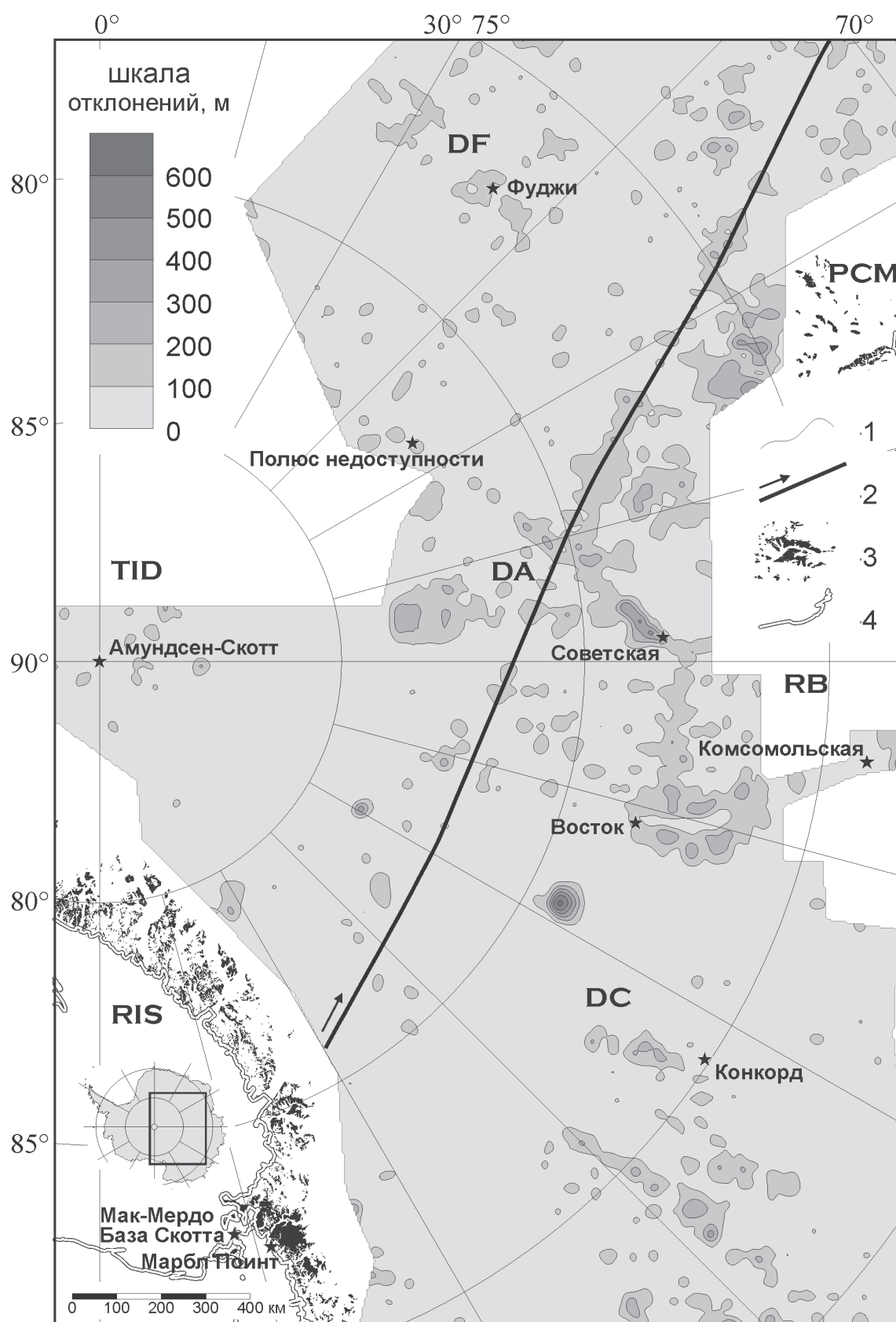


Рис. 8. Схема отклонений измеренных значений от грида. 1 — изолинии в метрах, сечение изолиний 100 м; 2 — положение маршрута М-1509 и его направление; 3 — горные выходы по данным проекта ADD; 4 — береговая черта и линия налегания шельфовых ледников по данным проекта ADD. DA — Купол Аргус; DC — Купол Конкордия; DF — Купол Фуджи; PCM — горы Принс-Чарльз; RB — ледораздел В; RIS — шельфовый ледник Ронне; TID — Купол Титан

Fig. 8. Grid error chart. 1 — error contours spaced with 100 m; 2 — M-1509 route and its direction; 3 — outcrops on ADD; 4 — ice front and grounding line on ADD. DA — Argus Dome; DC — Concordia Dome; DF — Fuji Dome; PCM — Prince Charles Mountains; RB — Ridge B; RIS — Ronne Ice Shelf; TID — Titan Dome

региональных геофизических работ. Она позволила сформировать улучшенные, по сравнению с предыдущими, grids мощности ледникового покрова и коренного рельефа на значительный участок Восточной Антарктиды, включающий области зарождения и развития дренажных систем ледосборных бассейнов Берда, Ламберта, Скотта, Денмана, Тоттена, Пауэра и Фроста, общий годовой сток материкового льда которых в океан составляет более половины стока Восточной Антарктиды. Кроме того, отечественные радиолокационные данные были пересмотрены, что позволило выполнить более детальную и корректную интерпретацию временных радиолокационных разрезов с учетом моделирования распространения электромагнитных волн в ледниковой толще.

В результате выполненных исследований составлены более корректные и более детальные карты мощности ледникового покрова и подледного рельефа, которые заметно отличаются от карт, представленных в проекте BEDMAP. Сравнение новой и ранее опубликованной карты коренного рельефа показывает, в частности, что горы Гамбурцева более расчленены и имеют явное СВ-ЮЗ простирание.

Авторы сознательно воздерживаются от анализа и описания составленных карт, полагая, что это тема отдельной научной работы и, соответственно, отдельной публикации.

Благодарности

Авторы приносят свою благодарность В.О. Леонову и В.С. Мандрикову за плодотворное обсуждение вопросов генерализации данных и составления карт региональных масштабов; Dr. David G. Vaughan и Британской Антарктической Службе (BAS) за предоставленные материалы проекта BEDMAP. Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-05-00401), подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики ФЦП «Мировой океан» (проекты 5 и 13) и Программы Президиума РАН 16 часть 2 (проект 3.3). Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ НШ-9757.2006.5

ЛИТЕРАТУРА

1. Капица А.П. Новые данные о мощности ледникового покрова центральных районов Антарктиды. — Информ. бюлл. САЭ, № 19, 1960, с. 10–15.
2. Капица А.П., Сорохтин О.Г. Измерения толщины ледникового покрова в походе по маршруту Восток — Молодежная. — Информ. бюлл. САЭ, № 51, 1965, с. 19–23.
3. Коган А.Л. Рельеф ложа ледника и некоторая геологическая характеристика подстилающих пород по маршруту Молодежная — Полюс относительной недоступности. — Информ.

- бюлл. САЭ, № 70, 1968, с. 7–14.
4. Козлов А.И., Федоров Б.А. Радиолокационное зондирование антарктических ледников летом 1967/68 г. — Информ. бюлл. САЭ, № 71, 1968, с. 53–57.
5. Ласточкин А.Н., Попов С.В. Методика выделения структурных линий в подледно-подводном рельефе Антарктики. — Геоморфология, № 1, 2004, с. 34–43.
6. Ласточкин А.Н., Попов С.В. Морфодинамическая концепция и системно-морфологическая основа субгляциальной геоморфологии Антарктики. — Материалы XXVII пленума Геоморфол. комиссии РАН. Томск, 2003, с. 65–72.
7. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде. — Докл. АН, т. 379, № 5, 2001, с. 680–685.
8. Попов С.В. Методика обработки аналоговых материалов радиолокационного профилирования. — Росс. геофиз. журнал, т. 23–24, 2001, с. 57–61.
9. Попов С.В., Масолов В.Н., Волнухин В.С. 40 лет отечественным радиолокационным исследованиям в Антарктиде. — Программа и тезисы докладов на науч. конфер. «Россия в Антарктике», 12–14 апреля 2006 г. СПб., 2006, с. 189.
10. Попов С.В., Масолов В.Н., Лейченко 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., с. 13.
11. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Современные отечественные сейсмо-радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде в преддверии Международного полярного года. — Симпозиум «Гляциология в канун Международного полярного года», Пушкинские Горы, 9–12 октября 2006 г., с. 9.
12. Попов С.В., Поздеев В.С. Ледниковый покров и коренной рельеф района гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида). — МГИ, вып. 93, 2002, с. 205–214.
13. Попов С.В., Филина И.Ю., Соболева О.Б. и др. Мелкомасштабные аэро-радиолокационные исследования в Центральной Восточной Антарктиде. — Тр. XVI–XIX Всеросс. симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред», вып. 2. М., 2002, с. 84–86.
14. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б., Масолов В.Н., Лукин В.В. Результаты радиолокационного профилирования вдоль трассы следования санно-гусеничного похода Мирный — Восток. — Программа и тезисы докладов на науч. конфер. «Россия в Антарктике», 12–14 апреля 2006 г. СПб., 2006, с. 191.

15. Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н., Лукин В.В. Основные результаты наземного радиолокационного профилирования в районе подледникового озера Восток в 1998–2002 гг. — МГИ, вып. 94, 2003, с. 187–193.
16. Сорохтин О.Г., Авсюк Ю.Н., Коптеев В.И. Результаты определения мощности ледникового покрова в Восточной Антарктиде. — Информ. бюлл. САЭ, № 11, 1959, с. 9–13.
17. Цукерник В.Б. Новые данные о подледном рельефе центрального сектора Восточной Антарктиды по сейсмогравиметрическим материалам. — Информ. бюлл. САЭ, № 32, 1962, с. 10–14.
18. BEDMAP. Report of the 1st BEDMAP Workshop on Antarctic Bed Mapping. Cambridge, 21–22 October 1996.
19. BEDMAP. Report of the 2nd BEDMAP Workshop on Antarctic Bed Mapping. Cambridge, 24–25 July 1999.
20. Beitzel J. Geophysical exploration in Queen Maud Land, Antarctica. — AGU Antarctic Research Series, v. 16, 1971, p. 39–87.
21. Bell R.E., Studinger M., Fahnstock M.A., Shuman C.A. Tectonically controlled subglacial lakes on the flanks of the Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica. — GRL, v. 33, 2006, L02504, doi:10.1029/2005GL025207.
22. Briggs I. C. Machine contouring using minimum curvature. — Geophysics, v. 39, № 1, 1974, p. 39–48.
23. British Antarctic Survey. Antarctic Digital Database, Version 2.0. Manual and bibliography. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge. 1998, 74 p.
24. China National Report. <http://www2.umaine.edu/itase/content/nationals/china.html>.
25. Crary A.P., Robinson E.S. Oversnow traverses from McMurdo to the South Pole. — Science, v. 135, 1962, p. 291–295.
26. Cressie N.A.C. The origins of kriging. — Mathematical Geology, v. 22, 1990, p. 239–252.
27. Delaunay B. Sur la sphere vide. — Izvestia Akademii Nauk SSSR, VII Seria, Otdelenie Matematicheskikh Estestvennykh Nauk, 7, 1934, p. 793–800.
28. Drewry D.J. Antarctic ice sheet thickness and volume. — Antarctica: Glaciological and Geophysical Folio, Scott Polar Research Institute, Cambridge, England, 1983.
29. Drewry D.J., Jordan S.R. The bedrock surface of Antarctica. — Antarctica: Glaciological and Geophysical Folio, Scott Polar Research Institute, Cambridge, England, 1983.
30. Drewry D.J., Meldrum D.T. SPRI Folio Series. — Polar Record, v. 19, № 120, 1978, p. 267–278.
31. Franke R. Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods. — Mathematics of Computations, v. 33, № 157, 1982, p. 181–200.
32. Guibas L.J., Knuth D.E., Sharir M. Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi Diagrams. — Algorithmica, v. 7, № 4, 1992, p. 381–413.
33. Kerry K.E., Hawick K.A. Kriging interpolation on high-performance computers. Technical Report DHPC-035. University of Adelaide, Australia, 1998, 10 p.
34. Kerry K.E., Hawick K.A. Spatial interpolation on distributed, high-performance computers. Technical Report DHPC-015. University of Adelaide, Australia, 1997, 13 p.
35. Lee D.T., Schachter B.J. Two algorithms for constructing a Delaunay Triangulation. — Intern. Journ. of Computer and Information Sciences, v. 9, № 3, 1980, p. 219–242.
36. Lythe M.B., Vaughan D.G. and BEDMAP Consortium. BEDMAP — bed topography of the Antarctic, 1:10 000 scale map. BAS (Misc) 9. Cambridge: British Antarctic Survey, 2000.
37. 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, 2001, p. 11,335–11,351.
38. 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.
39. Mason D.C., O'Connell M., McKendrick I. Variable resolution block kriging using a hierarchical spatial data structure. — Intern. Journ. of Geographical Information Systems, v. 8, № 5, 1994, p. 429–449.
40. McLean M., Damaske D., Damm V., Reitmayr G. Airborne gravity data acquisition and processing: A case study in the Prince Charles Mountains, East Antarctica. — Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, Sydney 2004, Record 2004/18, p. 99–110.
41. 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.
42. Ruppert J.A. Delaunay refinement algorithm for quality 2Dimensional mesh generation. — Journ. of Algorithms, v. 18, № 3, 1995, p. 548–585.
43. 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.
44. Smith W.H.F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension. — Geophysics, v. 55, № 3, p. 293–305.
45. Studinger M., Bell R., Karner G.D. et al. Ice cover, landscape setting and geological framework of VSL, East Antarctica. — Earth Planetary Science Letters, v. 205, 2003, p. 195–210.
46. Tabacco, I.E., Bianchi C., Zirizzotti A. et al. Airborne radar survey above Vostok region, east Antarctica: ice thickness and VSL geometry. — Journ. of Glaciology, v. 48, 2002, p. 62–69.

SUMMARY

The new bedrock topography map has been compiled for the central region of East Antarctica using ice thickness data available in the BEDMAP Project data base and new information obtained after 2000 by the Russian Antarctic Expedition (when the BEDMAP product finished). Moreover, airborne radio-echo sounding data acquired during the Soviet Antarctic Expeditions

(before 1992) between Enderby Land and the Gamburtsev Subglacial Mountains and recorded on films have been revised and reinterpreted. This work allowed imaging of the improved bedrock topography for this area. Unlike the previously published bedrock topography map produced by the BEDMAP Project, the new map shows real bathymetry of Lake Vostok and some earlier not recognized morphological features of the Gamburtsev Subglacial Mountains and area to the north of them.