

Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подлёдный и коренной рельеф

© 2011 г. С.В. Попов¹, В.Н. Масолов¹, В.В. Лукин^{2,3}

¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург; ²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург; ³Российская антарктическая экспедиция, Санкт-Петербург
spopov67@yandex.ru

Статья принята к печати 28 августа 2010 г.

Антарктида, коренной рельеф, мощность ледникового покрова, подледниковые водоёмы.
Antarctica, bedrock, ice thickness, subglacial water caves.

Обобщаются отечественные наземные (за период 1995–2008 гг.) и американские аэрогеофизические (2000/01 г.) материалы. На основе сводного комплекта данных радиолокационного профилирования и отечественных сейсмических исследований МОВ разработаны модели мощности ледникового покрова, подлёдного и коренного рельефа района оз. Восток, а также его глубин. Установлено, что мощность ледникового покрова в районе оз. Восток колеблется от 1950 до 4350 м. Абсолютные высоты поверхности озера изменяются от –600 м в северной части до –150 м в южной. Средняя глубина озера составляет около 400 м, а объём воды в нём – 6100 км³.

Введение

Практически сразу после открытия подледникового оз. Восток [14, 19] началось его планомерное изучение. 13 полевых сезонов (1995–2008 гг.) сотрудники Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ) в составе Российской антарктической экспедиции (РАЭ) проводили в этом районе сейсмические и радиолокационные исследования. В основные задачи исследований входило: 1) нахождение береговой линии подледникового оз. Восток и выявление подледниковых водоёмов; 2) выяснение мощности ледника и высот подлёдного рельефа; 3) определение глубин оз. Восток и конфигурации его придонной части. Методические аспекты выполнения исследований и характеристика используемой аппаратуры достаточно подробно изложены в работах [2, 7, 8, 15, 16,]. Всего в процессе указанных работ проведено 318 сейсмических зондирований МОВ и 5190 пог. км радиолокационных маршрутов (рис. 1).

Перед началом основных работ выполнены специальные исследования по повышению точности получаемых данных. Так, акустические параметры ледника в скв. 5Г-1, пробуренной на станции Восток, определяли с помощью вертикального сейсмического профилирования (ВСП). Измерения показали, что средняя скорость распространения упругих волн в нём составляет 3810 ± 20 м/с; скорость в чистом атмосферном льду (пластовая скорость) равна 3920 ± 20 м/с [2, 3, 15]. По данным ВСП определена мощность ледника от забоя скважины до поверхности озера. На момент выполнения работ она составила 130 м от глубины забоя 3623 м [2, 3]. Средняя скорость распространения электромагнитных волн в леднике, полученная методом наклонного

зондирования, в районе станции Восток составила $168,4 \pm 0,5$ м/мкс [9, 18].

В изучение этого района значительный вклад внесли зарубежные исследователи. В сезон 2000/01 г. американские учёные провели комплексную аэрогеофизическую съёмку по регулярной сети маршрутов широтного простираения на территории около 68 620 км². В процессе съёмки пройдено 43 рядовых и 12 секущих маршрутов (см. рис. 1). Средняя протяжённость рядовых маршрутов составляла около 188 км при расстоянии между ними 7,5 км. Средняя протяжённость секущих маршрутов, которые проходили ортогонально рядовым, равна около 365 км при расстоянии между ними около 11,3 км в краевой части подледникового оз. Восток и около 22,5 км в его центральной части. Среднее расстояние между пунктами измерений – 17,5 м. Общая протяжённость маршрутов (исключая дублирующие и служебные) – 12 464 км. Кроме радиолокационного профилирования, выполнены магнито- и гравиметрические измерения [20].

Завершение комплексных геофизических исследований и сотрудничество в рамках МПП с зарубежными коллегами позволили окончательно сформировать представления о строении района подледникового оз. Восток. Данная работа продолжает цикл публикаций, посвящённых проблеме изучения этой территории на основе обобщения результатов отечественных и американских геофизических данных.

Характеристика использованного материала

Проанализированы и сопоставлены радиолокационные данные, полученные отечественными и американскими исследователями. Прежде всего, отметим высокое качество материалов наших коллег.

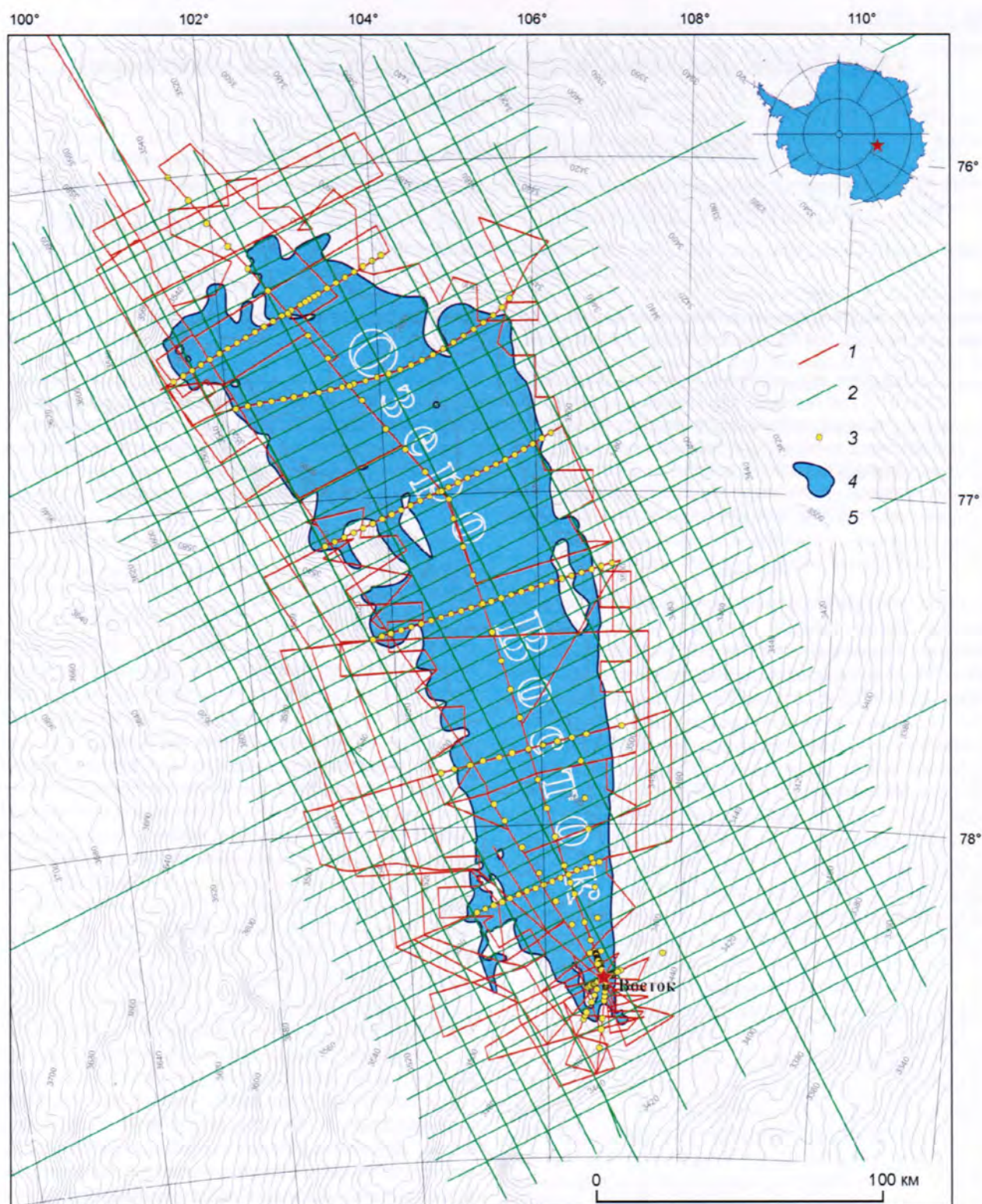


Рис. 1. Схема расположения современных отечественных и американских геофизических исследований в районе подледникового оз. Восток:

1 – маршруты РЛП 44–53 РАЭ (1998–2008 гг.); 2 – маршруты американской аэрогеофизической съёмки полевого сезона 2000/01 г.; 3 – пункты зондирования МОВ 41–53 РАЭ (1995–2008 гг.); 4 – акватория подледникового оз. Восток; 5 – изогипсы высот дневной поверхности, м, по [13]; сечение изогипсов – 5 м

Fig. 1. Location of Russian and American geophysical investigations in the Vostok Subglacial Lake area:
1 – Russian RES ground-based profiles of 44–53 RAE (1998–2008); 2 – American airborne geophysical profiles of 2000/01; 3 – Russian reflection seismic points of 41–53 RAE (1995–2008); 4 – water-table of Lake Vostok; 5 – ice surface elevation contours [13] in meters; the contour space is 5 m

Детальный статистический анализ показал, что оба банка данных сопоставимы по объёму (соответственно 56 5735 и 71 0448 пунктов измерений для отечественных и американских данных), исследованной территории (наши маршруты располагаются внутри контура американской съёмки) и точностным характеристикам. Это свидетельствует в пользу их объединения. Анализ невязок в точках пересечения показывает взаимное качество данных.

На рис. 2 а, б отдельно приведены гистограммы невязок мощности ледника по отечественным и американским радиолокационным данным. Статистические характеристики объективно указывают, что по формальным параметрам качество обеих съёмок сопоставимо. Большая симметричность (а следовательно, и большая близость к нормальному распределению) данных американской съёмки обусловлена большим (более чем в 3 раза) числом точек невязок.

Кроме того, необходимо учесть одно важное обстоятельство: в силу поставленных задач и используемой методики работ практически все пункты пересечения отечественных маршрутов РЛП были расположены за пределами акватории оз. Восток, т.е. на наклонных (иногда значительно) участках подлёдной поверхности. Это означает, что вклад пунктов невязок над субгоризонтальной поверхностью акватории озера (где обычно невязки незначительны) минимален. Вместе с тем, как следует из схемы расположения аэрогеофизических маршрутов американских коллег (см. рис. 1), доля их пунктов невязок над акваторией весьма существенна и составляет почти половину общего их числа.

На рис. 2, в показана гистограмма невязок отдельно между маршрутами отечественных и американских исследователей. Как следует из приведённых статистических характеристик, ошибка увели-

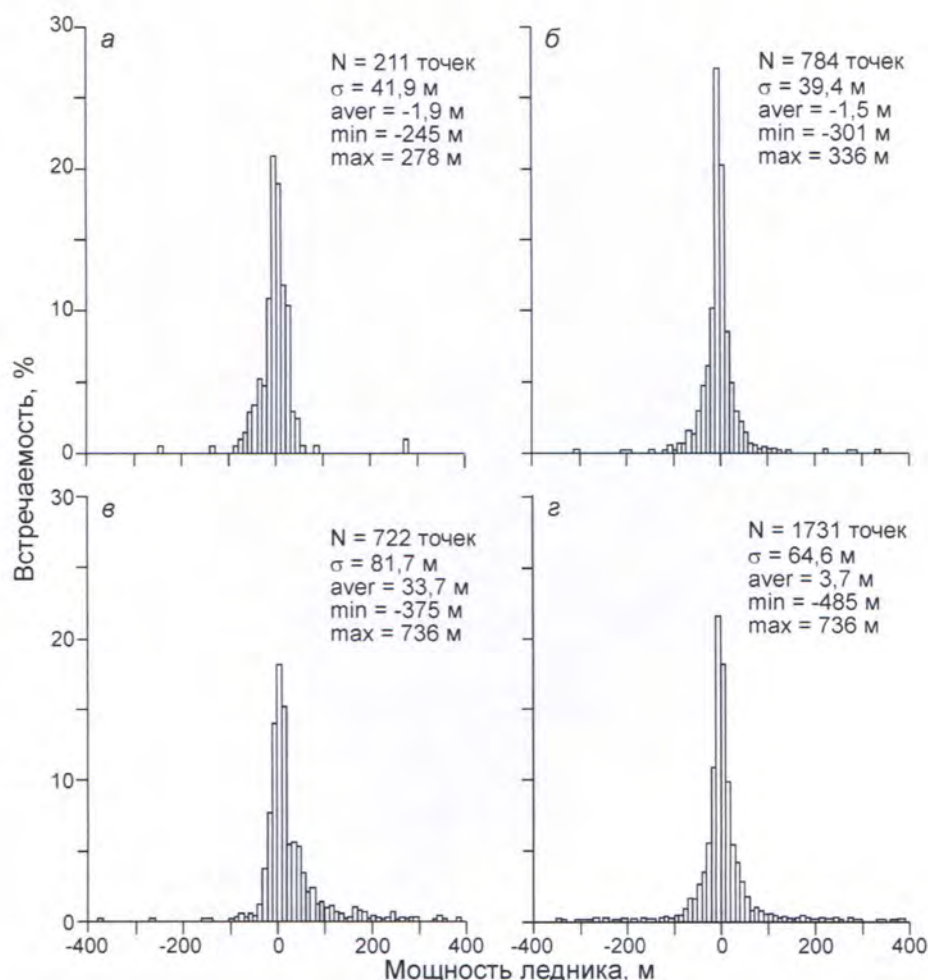


Рис. 2. Гистограммы невязок мощности ледника по отечественным и американским радиолокационным данным.

Невязки: а – по отечественным маршрутам, б – по американским маршрутам, в – отдельно между отечественными и американскими маршрутами, г – объединённого комплекта данных

Fig. 2. Histogram of the ice thickness differences in the cross-points of Russian and American RES data, as calculated based on: а – Russian data; б – American data; в – Russian and American data separately; г – the join dataset

чилась приблизительно вдвое. Тем не менее, вид гистограммы вблизи центрального пика практически не изменился, правда, существенно возросла доля аномально высоких значений невязок (более 150 м). Эти точки, несмотря на их небольшое относительное число (два значения для > 500 м; три — для 400–500 м; восемь — для 300–400 м и 22 — для 200–300 м; всего менее 5 %), вносят существенный вклад в увеличение стандартного отклонения и среднего значения выборки. Пространственно почти все они располагаются над участками с пересечённым подлёдным рельефом. Для подобных районов характерна сложная волновая картина с обилием боковых волн [4, 5]. Данное обстоятельство, вероятно, обусловлено ошибками, допущенными при интерпретации временных радиолокационных разрезов, когда за целевую границу было принято боковое отражение. В подобных случаях положение границы, как правило, заглубляется. Один и тот же знак ошибок (и как следствие — значительное влияние на среднее значение выборки) позволяет предположить, что большая их часть связана с интерпретацией именно аэро-радиолокационных данных. Отметим, что последующее гридирование мощности ледника визуальное увеличило контрастность выявляемых форм. Это показывает, что ошибки имеют локальный характер и существенно не влияют на качество формирования грида. В противном случае, ввиду внутреннего конфликта данных, наблюдались бы некоторая общая размытость структур, «затяжки» изолиний и наличие изометричных форм рельефа, расположенных вдоль маршрутов. Последняя гистограмма (см. рис. 2, г) сформирована для объединённого набора данных. Распределение близко к нормальному, что свидетельствует о сбалансированности данных.

Таким образом, оба банка данных имеют сопоставимые точность измерений и объём. Результаты съёмки американских коллег перекрывают существенную часть территории, не охваченной наземными работами. Вместе с тем включение маршрутов наземных исследований примерно втрое увеличивает плотность пунктов измерений за пределами акватории озера. Оба комплекта данных дополняют друг друга и, несомненно, повышают качество конечного продукта — карты изолиний.

Мощность ледника и подлёдный рельеф

По результатам отечественных и американских радиолокационных измерений сформирован грид мощности ледникового покрова. Для выбора наилучшего алгоритма гридирования применительно к имеющемуся материалу проведено сравнение различных интерполяционных методик. Рассматривались как классические алгоритмы, проверенные временем (*Inverse Distance*, *Kriging* и *Triangulation*), так и

более современные (*Minimal Curvature*, *Radial Basic Function*, *Modified Shepard's Method*, *Natural Neighbor*, *Nearest Neighbor* и *Moving Average*).

Девятью названными способами выполнялось формирование гридов с размерами ячеек трёх видов, км: 1×1 , 2×2 и 5×5 (опыт авторов показывает, что оптимально именно использование квадратных ячеек). Основные оценочные параметры, характеризующие качество построений, — ошибка грида σ_G и его «геологичность». Если первый определяется статистически, то второй оценивается субъективно. Ошибка грида соответствует стандартному отклонению разности N измерений z_i от грида \bar{z}_i :

$$\sigma_G^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z}_i)^2 [10].$$

Гридирование выполнялось с применением картографической программы *Surfer 9.2* (*Golden Software Inc.*).

Анализ ошибки грида показывает, что по формальным статистическим параметрам предпочтительнее использование алгоритмов *Natural Neighbor*, *Minimal Curvature*, *Inverse Distance* и *Kriging*. Однако с позиций «геологичности» карты первые два менее стабильны. Они, в отличие от двух последних, при неравномерном распределении пунктов измерений формируют выраженные протяжённые аномалии, которые не отражают истинную природу изучаемых объектов. Итак, выводы относительно методики гридирования, сделанные при анализе данных по району подледникового оз. Восток (которые характеризуются относительно неравномерным распределением) и при составлении карты коренного рельефа регионального масштаба в рамках проекта ABRIS [10], совпадают. К наиболее предпочтительным относятся методики *Inverse Distance* и *Kriging*. Тем не менее, данные более детального анализа показывают следующее. Несмотря на то, что использование алгоритма *Inverse Distance* по сравнению с *Kriging* уменьшает ошибки грида, изолинии, сформированные с помощью *Kriging*, в ряде случаев более «геологичны». Поэтому именно этот метод использовался для формирования окончательного грида мощности ледникового покрова.

Грид мощности ледника формировался методом *Kriging* с размером ячейки 2×2 км и радиусом осреднения 6 км. Мощность ледникового покрова района оз. Восток представлена на рис. 3. Радиус осреднения влияет, главным образом, на экстраполяцию в районах, где отсутствуют пункты измерения. При этом вклад удалённых пунктов измерений на формирование значения в узле минимален. Для придания изолиниям плавности проведено сплайновое сглаживание путём формирования двух дополнительных узлов между узлами исходного грида. Затем выполнялось матричное сглаживание посредством осредне-

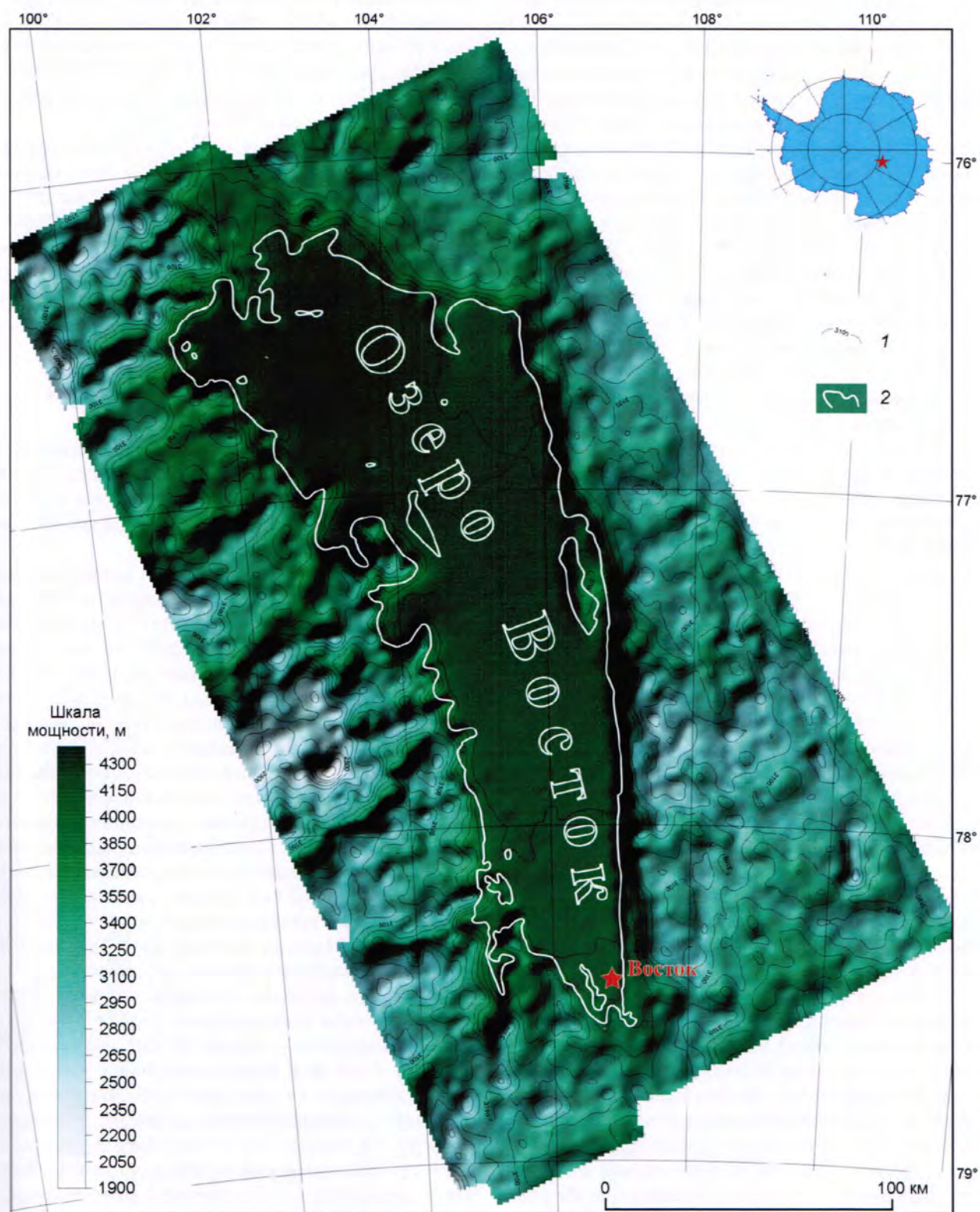


Рис. 3. Мощность ледникового покрова в районе подледникового оз. Восток:

1 – изопохиты ледникового покрова, м; сечение изолиний 150 м; 2 – береговая линия оз. Восток

Fig. 3. Ice thickness of the Vostok Subglacial Lake area:

1 – ice thickness contours in meters; the contour space is 150 m; 2 – Lake Vostok shoreline

ния по девяти узлам. Для объективной оценки качества построений выполнен статистический анализ отклонений измеренных значений от сформированного грида, согласно которому среднеквадратическая ошибка грида мощности ледника составила 69 м.

Мощность ледникового покрова в районе оз. Восток колеблется от 1950 до 4350 м (см. рис. 3). Наибольшие значения зарегистрированы в районе заливов и бухт, расположенных в северной и северо-западных частях. У восточного берега озера наблюдается утолщение ледника на 80–100 м. Это вызвано его натеканием на крутой борт котловины. Барьеры на пути движения ледника (мысы и полуострова) также вызывают его утолщение в заливах западного берега. Максимальная мощность, измеренная здесь отечественными исследователями, составила 4350 м [2, 8]. Мощность ледникового покрова над акваторией озера колеблется от 3600 м в южной части до 4350 м в северной. За пределами озера мощность ледникового покрова заметно меньше, что связано с характером подлёдного рельефа. Значительное снижение мощности ледника наблюдается в западной и восточной частях, где её величина составляет 1950 и 2600 м соответственно.

Подлёдный рельеф (рис. 4) формируется путём вычитания мощности ледника из высот дневной поверхности. В качестве последней выбрана модель, полученная по данным лазерного альтиметра GLAS спутника ICESat; альтиметр излучает в инфракрасном (длина волны 1064 нм) и видимом (длина волны 532 нм) диапазонах [22]. В настоящее время это — наиболее современная и точная модель [12]. Данные с пространственным разрешением 500 м доступны в сети Интернет по адресу ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/DEM/nsidc0304_icesat_antarctic_dem [13].

Характер подлёдного рельефа (см. рис. 4) к западу и к востоку от оз. Восток принципиально разный. Для западной части характерен преимущественно горный ландшафт, поскольку здесь расположены отроги Комсомольских гор [6, 10]. Абсолютные высоты здесь достигают 1580 м. Привершинный ярус представлен плоскими слаборасчленёнными (перепад высот менее 100 м) поверхностями, характерными для экзарационной деятельности. К межгорным прогибам приурочены многочисленные троговые долины преимущественно северо-восточного простирания. Некоторые из них имеют протяжённость (наблюдаемую) около 40 км при ширине от 5 км и более. Придонная часть долин находится на абсолютных высотах, соответствующих, главным образом, уровню моря (поверхности геоида WGS-84). Склоны долин достаточно пологи: уклоны не превышают 5° при высоте склонов около 300 м.

К востоку от акватории озера расположена равнина Шмидта [6, 10]. Для обсуждаемого фрагмента под-

лёдного рельефа характерен слаборасчленённый холмистый ландшафт без ярко выраженного простирания морфоструктур. Абсолютные высоты преимущественно составляют около 300 м и лишь в районе 77°45' ю.ш. имеется поднятие высотой приблизительно 600 м. В целом, перепады высот — около 100 м.

Оз. Восток занимает доминирующее положение. Его водное зеркало не горизонтально, как в обычных водоёмах нашей планеты. Абсолютные высоты поверхности озера в генеральном плане (если аппроксимировать поверхность озера плоскостью) изменяются от –600 м в северной части до –150 м в южной; наклон поверхности озера составляет около шести угловых минут. Данное обстоятельство объясняется законами гидростатики [11].

Глубина озера Восток и характеристика его придонной части

Большой объём сейсмических измерений МОВ, выполненных на протяжении 12 лет исследований (см. рис. 1), позволил получить целостное представление о глубине (рис. 5) и рельефе придонной части подледникового оз. Восток (рис. 6).

При составлении карты глубин авторы столкнулись с известной проблемой адекватного отображения геофизической информации. С появлением вычислительной техники подобные построения ведутся достаточно формальным образом: создаётся прямоугольная матрица (грид), которая заполняется некоторыми эффективными значениями. Авторы не ставят под сомнение положительные аспекты этой прогрессивной технологии, однако небезосновательно считают, что в случае недостаточной обеспеченности территории данными автоматизированное составление карт даёт существенно худшие результаты, чем ручное. Подобная ситуация имеет место и в нашем случае, так как среднее расстояние между сейсмическими профилями составляет около 50 км (см. рис. 1). Именно поэтому карта рельефа дна оз. Восток создавалась ручным способом.

Согласно расчётам, площадь водного зеркала озера (с учётом островов) составляет 15 425 км², объём водного тела — около 6100 км³, средняя глубина озера — 400 м. В генеральном плане оно делится на две неравные по размерам части. Первая из них (южная) — наиболее глубоководная, но меньшая по размеру. Её размер 70 × 30 км. Средняя глубина — 900 м при максимальных отметках до 1200 м. Вторая часть (северная) — относительно мелководная, её размер 150 × 70 км. Средняя глубина — 300 м, максимальные отметки — до 600 м.

На графике (врезка на рис. 5) хорошо видна связь между глубинами оз. Восток и площадями, которые они занимают. Выделяются три чётких пика: первый из них (10 м) соответствует прибрежным

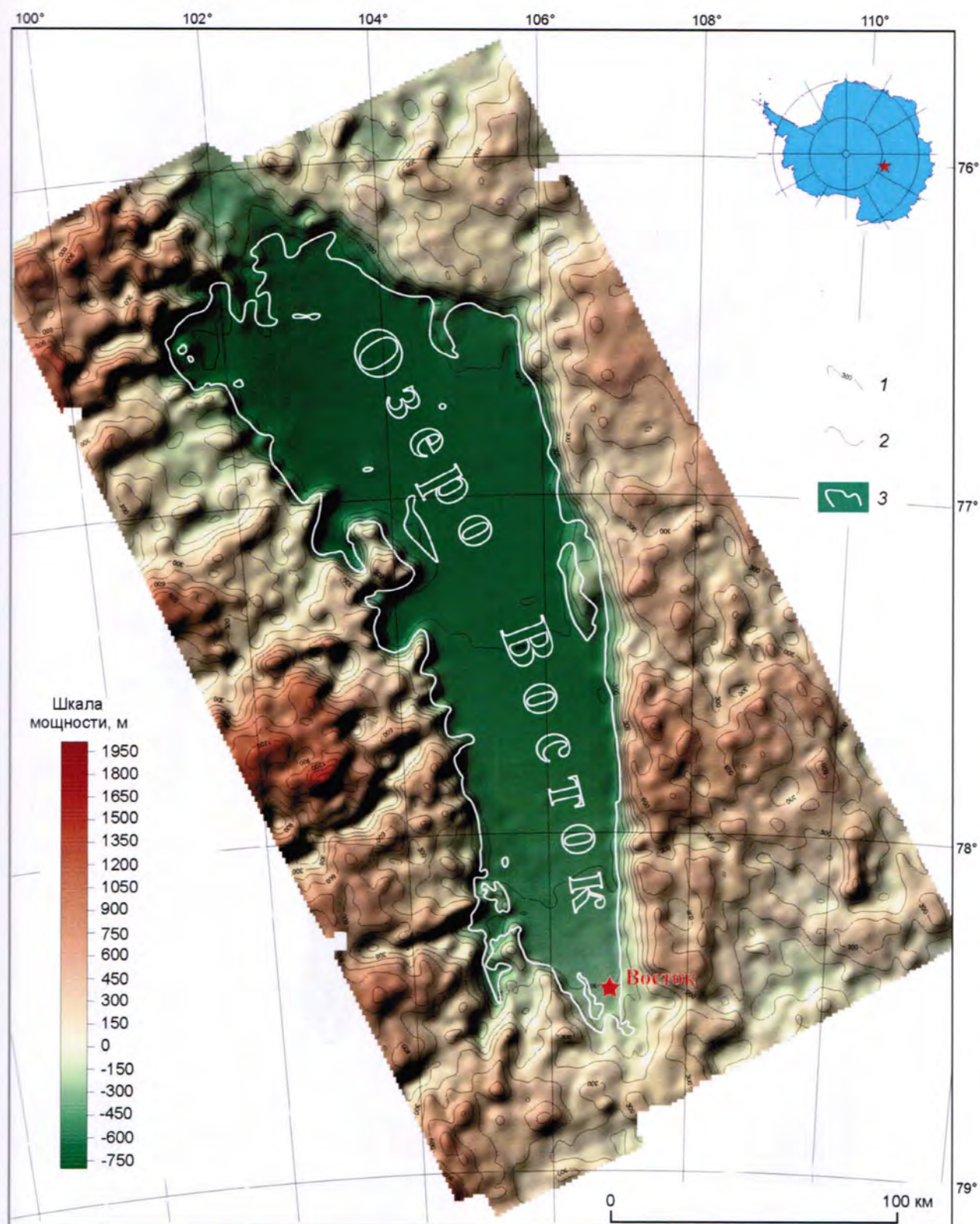


Рис. 4. Подлёдный рельеф района подледникового оз. Восток:

1 – изогипсы подлёдного рельефа, м; сечение изолиний 150 м; 2 – уровень моря (поверхность WGS-84); 3 – береговая линия оз. Восток

Fig. 4. Ice base of the Vostok Subglacial Lake area:

1 – ice base contours in meters; the contour space is 150 m; 2 – sea level (surface of WGS-84); 3 – water-table of Lake Vostok

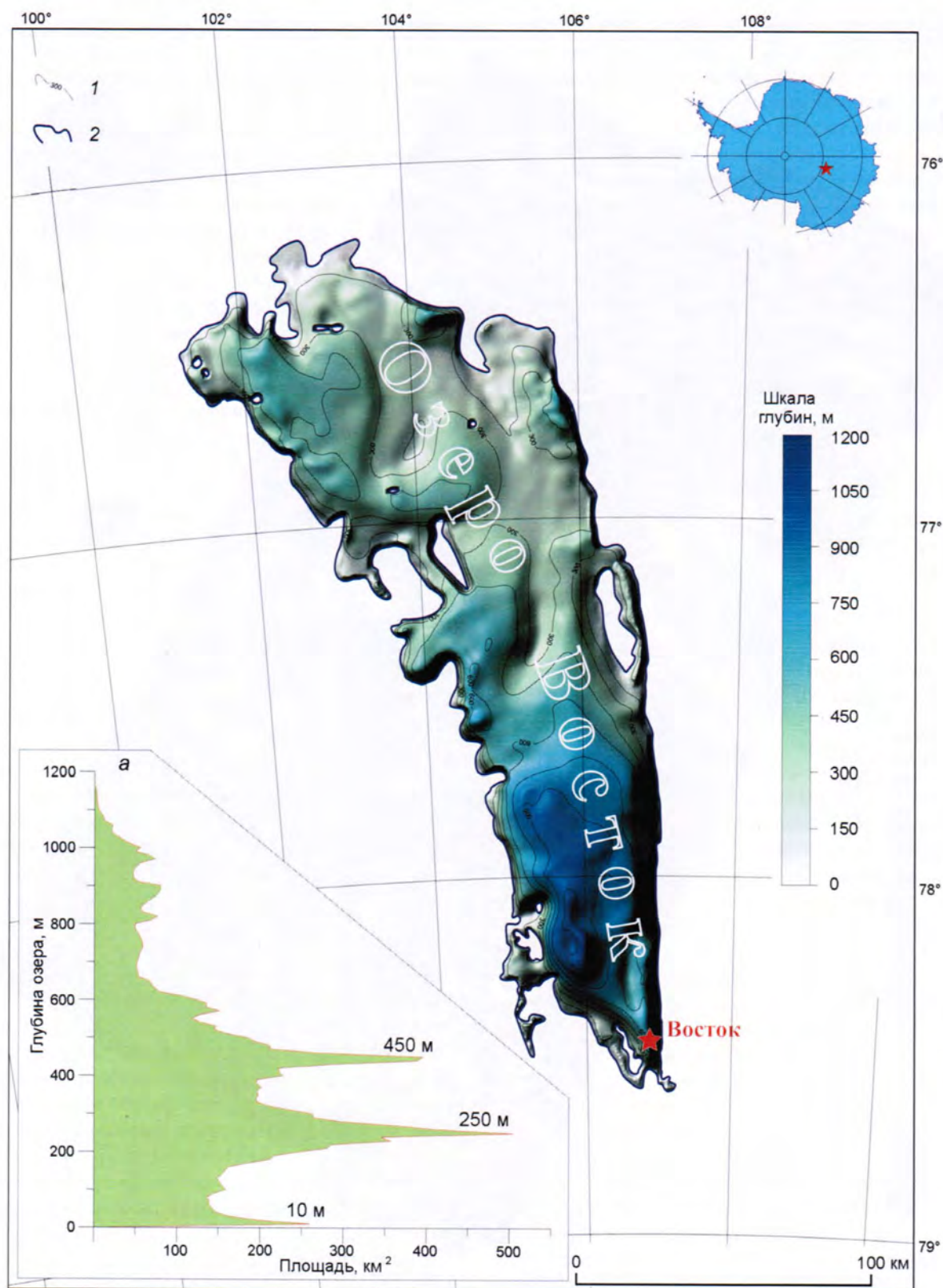


Рис. 5. Глубина подледникового оз. Восток:

a — зависимость между глубинами озера и занимаемой ими площадью; 1 — изобаты, м; сечение изолиний 150 м; 2 — береговая линия оз. Восток

Fig. 5. Depth of Vostok Subglacial Lake:

a — dependence between the lake depth and area of the depth; 1 — water depth contours in meters; the contour space is 150 m; 2 — water-table of Lake Vostok

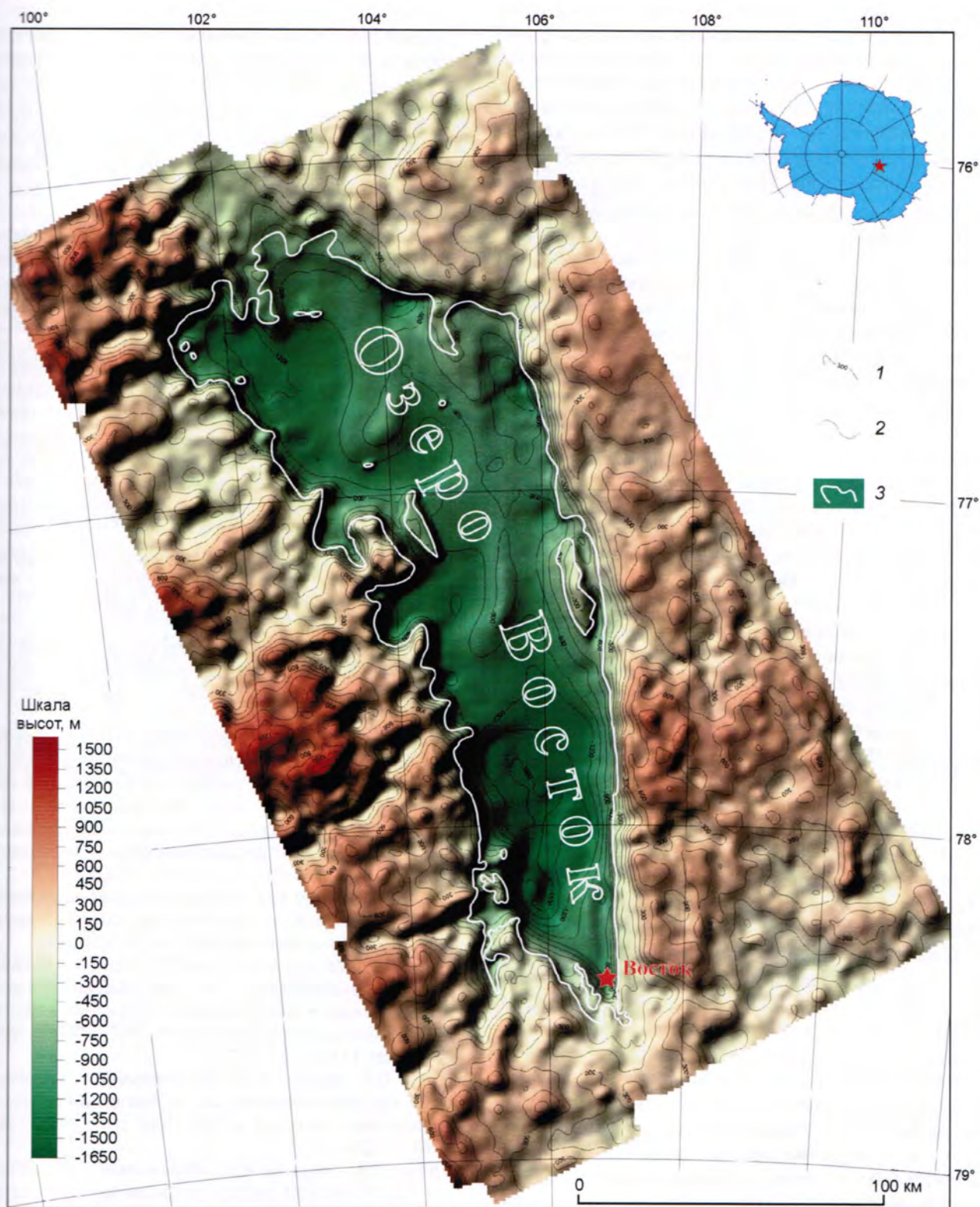


Рис. 6. Коренной рельеф района подледникового оз. Восток:

1 – изогипсы коренного рельефа, м; сечение изолиний 150 м; 2 – уровень моря (поверхность WGS-84); 3 – береговая линия оз. Восток

Fig. 6. Bedrock topography of the Vostok Subglacial Lake area:

1 – bedrock topography contours in meters; the contour space is 150 m; 2 – sea level (surface of WGS-84); 3 – Lake Vostok shoreline

частям озера; второй (250 м) может быть соотнесён со средними глубинами наиболее значительного по размерам мелководного бассейна, а также отдельными заливами, бухтами и фиордами; третий (450 м) связан с преобладающими значениями глубин подледникового оз. Восток полностью отражаются в рельефе дна (см. рис. 6). Для его формирования из высот подлёдного рельефа вычиталась глубина озера.

Отметим, что с позиций геоморфологической терминологии структуру, к которой приурочено оз. Восток, правильнее называть жёлобом (длинная и узкая впадина с крутыми склонами [1]), а не котловиной (впадина округлых или почти округлых очертаний [1]), поскольку соотношение её длины и ширины более чем 3:1.

Подлёдный рельеф (это — коренной рельеф, находящийся за пределами акватории) уже обсуждался нами. Поэтому здесь мы остановимся на описании придонной части жёлоба Восток. В целом, он представляет собой холмистую равнину (средняя абсолютная высота около —900 м), осложнённую рядом котловин и поднятий.

Среди поднятий наиболее значительны — острова, возвышающиеся пиками более чем на 300 м над придонной поверхностью. Относительные превышения, вероятно, весьма незначительны и составляют не более 100 м при максимальных уклонах до 4°. Холмистая равнина занимает территорию около 5800 км², т.е. свыше 1/3 всей территории озера (см. рис. 6).

В южной и северо-западной частях жёлоба Восток имеются две хорошо выраженные в рельефе котловины. Первая из них — более глубокая (около 400 м при средней крутизне склонов около 8°) и большая по размерам (приблизительно 60 × 30 км). Придонная часть котловины — уплощённая и располагается на абсолютных высотах около —1500 м. Размеры второй котловины — около 45 × 15 км. Относительные превышения и уклоны также незначительны. Придонная часть котловины располагается на абсолютных высотах около —1150 м.

Оценки рельефа дна и глубин подледникового оз. Восток делались и ранее, в частности, нашими американскими коллегами на основе аэрогравиметрических данных [21]. Главное отличие выполненной нами работы от построений американских исследователей состоит в том, что наши карты создавались на основе банка данных прямых натурных наблюдений и, следовательно, они в большей степени, чем результаты математического моделирования с использованием косвенных геофизических материалов (исследования американских специалистов), приближают нас к пониманию истинного характера глубин оз. Восток и, как следствие, строения его придонной части.

Заключение

Проведённые исследования позволили составить модели мощности ледникового покрова, подлёдного и коренного рельефа района, а также глубин оз. Восток. Это — первый шаг к дальнейшим научным исследованиям, направленным, прежде всего, на изучение особенностей строения коренного рельефа с позиций геоморфологии и тектоники.

Благодарности. Авторы признательны А.А. Екайкину (ААНИИ) за замечания и рекомендации, сделанные при подготовке статьи к печати, а также П.И. Лунёву (ПМГРЭ) за рекомендации и помощь в оформлении статьи.

Работа выполнялась в рамках проекта 2 подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан», а также при финансовой поддержке РФФИ (грант РФФИ № 07-05-00401а).

Литература

1. Геологический словарь: Т. 1 / Ред. К.Н. Паффенгольц. М.: Недра, 1978. 488 с.
2. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // ДАН. 2001. Т. 379. Вып. 5. С. 680–685.
3. Попков А.М., Веркулич С.Р., Масолов В.Н., Лукин В.В. Сейсмический разрез в районе станции Восток (Антарктида), результаты исследований 1997 года // МГИ. 1999. Вып. 86. С. 152–159.
4. Попов С.В. Интерпретация временного радиолокационного разреза с использованием моделирования распространения сферических электромагнитных волн в трёхмерном пространстве // МГИ. 2008. Вып. 105. С. 3–11.
5. Попов С.В. Методика обработки аналоговых материалов радиолокационного профилирования // Российский геофиз. журнал. 2001. Т. 23, 24. С. 57–61.
6. Попов С.В., Леонов В.О. Подлёдный рельеф центральной части Восточной Антарктиды (по данным проекта ABRIS) // Геоморфология. 2009. № 3. С. 100–111.
7. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические и наземные радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде накануне Международного полярного года 2007–2008 // МГИ. 2007. Вып. 103. С. 107–117.
8. Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н. Результаты наземных радиолокационных исследований подледникового озера «Восток» в 1998–2000 гг. // МГИ. 2001. Т. 89. С. 129–133.
9. Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н., Лучинин В.С. Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 206–208.
10. Попов С.В., Харитонов В.В., Масолов В.Н., Лейченко Г.Л., Котляков В.М., Москалевский М.Ю. Проект ABRIS: ледниковый покров и коренной рельеф района куполов Аргус, Конкордия, Титан и Фуджи (Восточная Антарктида) // МГИ. 2007. Вып. 103. С. 75–86.

11. 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. 2005. Вып. 98. С. 73–80.
12. Bamber J.L., Gomez-Dans J.L. The accuracy of digital elevation models of the Antarctic continent // *Earth Planetary Science Letters*. 2005. № 237. P. 516–523.
13. DiMarzio J., Brenner A., Schutz R., Shuman C.A., Zwally H.J. GLAS/ICESat 500 m laser altimetry digital elevation model of Antarctica. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. 2007. Digital media.
14. Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G.D., Siegert M.J., Zotikov I.A. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // *Nature*. 1996. V. 381. № 6584. P. 684–686.
15. Masolov V.N., Popov S.V., Lukin V.V., Sheremet'ev A.N., Popkov A.M. Russian geophysical studies of Lake Vostok, Central East Antarctica // *Antarctica – Contributions to Global Earth Sciences*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006. P. 135–140.
16. Popkov A.M., Kudryavtsev G.A., Shumilov V.A., Kondratiev N.V. Methodological features of seismic studies in the region of the Russian station Vostok // *Lake Vostok study: Scientific objectives and technological requirements*. Intern. Workshop. March 24–26, 1998. St. Petersburg: AARI, 1998. P. 28.
17. Popov S.V., Leitchenkov G.L., Moskalevsky M.Yu., Kharitonov V.V., Masolov V.N. The BEDMAP Consortium. ABRIS Project: new bedrock topography map for central Antarctica // *Proc. of the 10th ISAES, USGS Open-File Report 2007–1047*. Extended Abstract 026. 4 p.
18. Popov S.V., Sheremet'ev A.N., Masolov V.N., Lukin V.V., Mironov A.V., Luchininov V.S. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // *Journ. of Glaciology*. 2003. V. 49. № 165. P. 179–183.
19. Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // *Journ. of Glaciology*. 1993. V. 73. № 133. P. 625–634.
20. Studinger M., Bell R., Karner G.D., Tikku A.A., Holt J.W., Morse D.L., Richter T.G., Kempf S.D., Peters M.E., Blankenship D.D., Sweeney R.E., Rystrom V.L. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // *Earth Planetary Science Letters*. 2003. V. 205. P. 195–210.
21. Studinger M., Bell R.E., Tikku A.A. Estimating the depth and shape of subglacial Lake Vostok's water cavity from aerogravity data // *Geophys. Research Letters*. 2004. V. 31. L12401. doi:10.1029/2004GL019801
22. Zwally H.J., Schutz B., Abdalati W., Abshire J., Bentley C., Brenner A., Bufton J., Dezio J., Hancock D., Harding D., Her-ring T., Minster B., Quinn K., Palm S., Spinhirne J., Thomas R. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land // *Journ. of Geodynamics*. 2002. V. 34. № 3–4. P. 405–445.

Summary

This work presents a compilation of the Russian ground-based (collected in 1995–2008) and American (collected in 2000/01) airborne geophysical data. The models of the ice thickness, ice base and bedrock topography and the Vostok Subglacial Lake (VSL) depth were formed based on the joined set of radio-echo sounding and reflection seismic data. Ice thickness of the VSL area varies within 1950–4350 m. Absolute heights of the VSL water-table are changed approximately from –600 m in northern part to –150 m in the southern part. The volume of the water in the lake is about 6100 cubic km; the average depth is about 400 m.