



НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

Плотность и удельная аккумуляция снежного покрова в южной части подледникового озера Восток (Восточная Антарктида)

С.В. Попов¹, В.В. Харитонов², Ю.Б. Черноглазов¹

¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ПМГРЭ);

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

*Статья поступила в редакцию 25 февраля 2003 г.
Представлена членом редколлегии В.Н. Голубевым*

По результатам измерений в период 48-й РАЭ (2002/03 г.) составлены карты средней плотности снежного покрова, толщины его годовых слоев и удельной аккумуляции в районе оз. Восток.

В течение летних полевых сезонов 44–47-й российских антарктических экспедиций (1998–2002 гг.) Полярная морская геологоразведочная экспедиция выполняла радиолокационное профилирование с целью изучения ледникового покрова и коренного рельефа района подледникового оз. Восток [1–7]. В ходе этих работ было замечено, что тягач и передвижной балок с установленной радиолокационной аппаратурой при движении над акваторией озера увязают в снегу значительно глубже, чем за его пределами. Такое наблюдение послужило толчком к выполнению измерений удельной аккумуляции (начатых в период 47-й РАЭ [5]) и плотности снежного покрова во время научного похода по исследованию южной части подледникового оз. Восток в период 48-й РАЭ (2002/03 г.).

Методика

Средняя толщина годовых слоев снежного покрова измерена в шурфах глубиной от 2 до 2,8 м, вырытых по маршрутам научного похода (рис. 1). В журнале наблюдений фиксировали глубину расположения визуально выделяемых слоев, разрез снежного покрова фотографировали. Рабочую поверхность в шурфе покрывали раствором акварельной краски или туши

из пульверизатора, и поскольку снег впитывает раствор в соответствии со своей пористостью, а, следовательно, и плотностью, более плотные слои контрастно выделялись на общем фоне (рис. 2). Впервые такая методика была с успехом апробирована при гляциологических исследованиях в период 47-й РАЭ [5].

На рабочей поверхности шурфа выделялось, как правило, более 20 слоев. Этого вполне достаточно для статистической обработки, которая была выполнена прямо в походе. Быстрота обработки позволяла оперативно планировать гляциологические наблюдения в пунктах, наиболее подходящих с точки зрения последующего построения карт.

Номер слоя (возраст в годах) сопоставляли с глубиной его залегания. Затем эти пары заносили в калькулятор и вычисляли коэффициенты линейной регрессии методом наименьших квадратов [6] (коэффициент при линейном члене и есть средняя толщина годового слоя снега [5]).

При выделении и сопоставлении годовых слоев допускалась возможность их пропуска или наличия дополнительных слоев, образовавшихся в зависимости от метеорологических условий снегонакопления в один год и расположенных близко друг к другу. Индикатором корректности определения глубины зале-

гания слоя и его возраста служил коэффициент корреляции линейной регрессии R [6], который в наших расчетах превысил 99,8%. Кроме того, в пункте G42 (см. рис. 1) было выполнено две серии измерений на соседних стенках шурфа. Отличие между рассчитанными средними толщинами годовых слоев при этом составило 0,21 см (2,5%). В районе станции Восток во время 47-й и 48-й РАЭ были выкопаны шурфы на расстоянии около 200 м друг от друга, в которых также определена средняя толщина годовых слоев \bar{T} [5]. Расхождение между полученными значениями составило 0,01 см. Среднюю из этих оценок (0,1 см) мы приняли за точность определения \bar{T} .

Для точки G46, например, можно подобрать слой так, чтобы они практически горизонтально про-

слеживались от предыдущей точки G45 ($\bar{T}=8,3$ см) и для нее \bar{T} было равно 8,1 см вместо 6,6 см. Однако тогда уменьшится коэффициент корреляции R от 99,91 до 99,68%. Аналогичную процедуру можно провести, например, для точки G34, и получить значение средней толщины годовых слоев, равное 7,9 вместо 8,2 см; однако при этом R также уменьшится от 99,86 до 99,84%. Такое изменение не существенно, но гораздо меньше, чем в первом случае, было и изменение средней толщины годовых слоев. Попробуем определить заново границы слоев в точке G27, для которой $\bar{T} = 8,3$ см и $R = 99,73\%$. Если распределить слои по-иному, так, чтобы они залегали приблизительно на одинаковой глубине в соседних пунктах измерений, то получим $\bar{T}=7,9$ см при $R = 99,33\%$, что

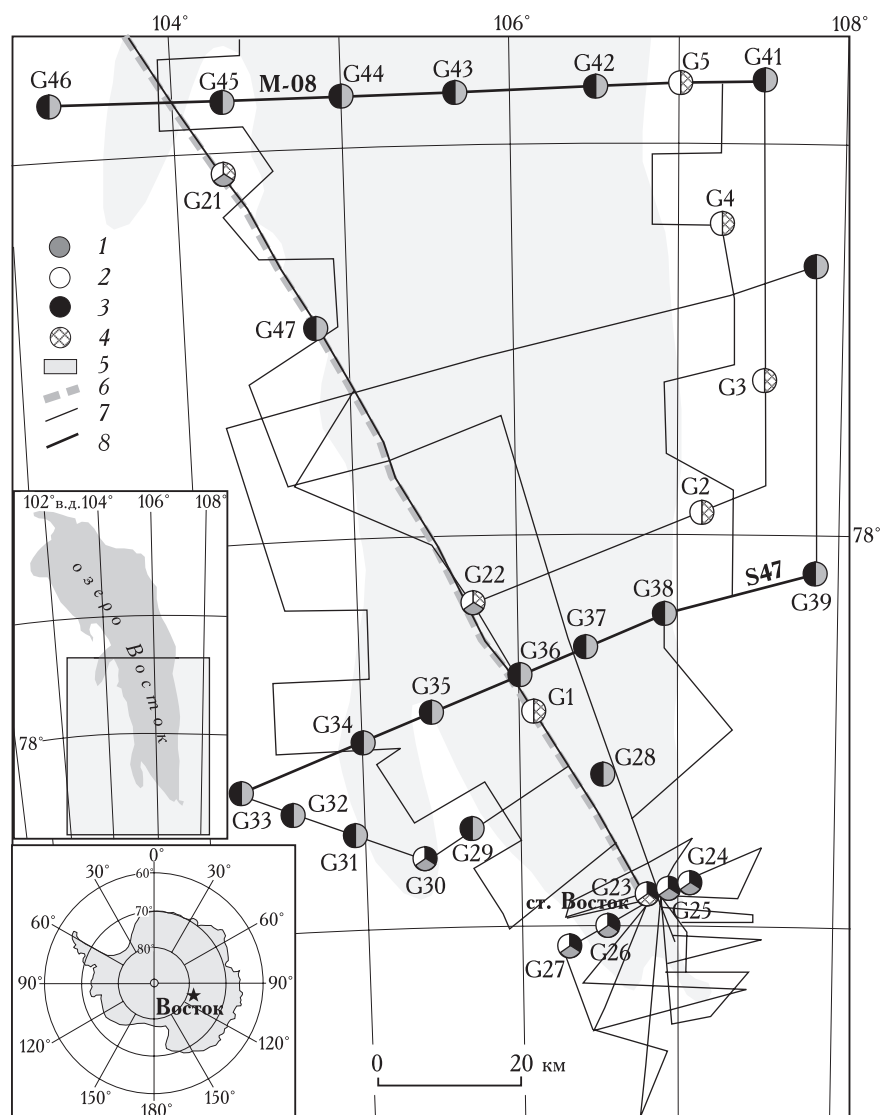


Рис. 1. Схема расположения пунктов гляциологических наблюдений и маршрутов научного похода в летний полевой сезон 48-й РАЭ. Измерения удельной аккумуляции в шурфах (1) и по вехам (2), плотности снежного покрова (3) и средней скорости и направления движения ледника по вехам (4), положение водного зеркала подледникового оз. Восток (5), трасса санно-гусеничного похода Мирный-Восток (6), радиолокационные маршруты 44–48-й РАЭ (7), положение разрезов, показанных на рис. 6 (8)

Fig. 1. Location map: measurements of the mean surface accumulation in snow pits (1) and at stakes (2), sites of snow density measurements (3) and ice velocity (4), water table position of Vostok subglacial lake (5), Myrny-Vostok traverse (6), RES profiles of 44–48 RAE (7), location of sections shown in Fig. 6 (8)

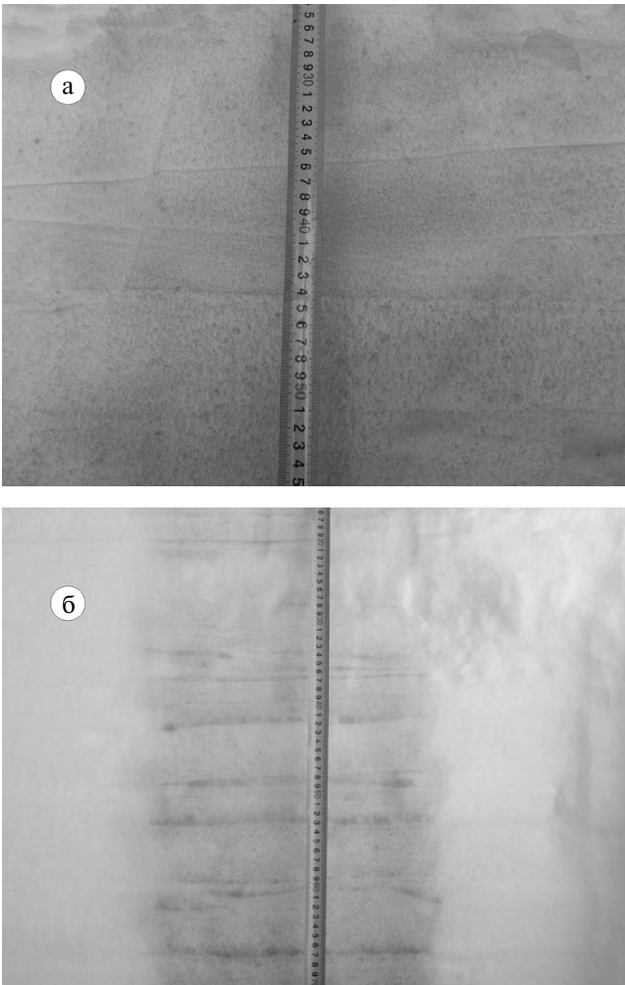


Рис. 2. Фотографии верхней части разреза снежного покрова в пунктах G31 (а) и G43 (б) (см. рис. 1)
Fig. 2. Snow-section photos made at sites G31 (a) and G43 (b) (see location in Fig. 1)

явно хуже, чем при предлагаемом расположении. Даже смещение двух слоев на один с целью выравнивания их между соседними точками сразу же ведет к уменьшению R . Таким образом, линейная зависимость глубины залегания годовых слоев от возраста, т.е. равномерность удельной аккумуляции, более обоснована, чем субгоризонтальность их расположения от точки к точке.

Плотность снежного покрова измерена с помощью весового походного снегомера. В каждом пункте, где был выполнен весь комплекс гляциологических наблюдений, проведено от 5 до 11 измерений приповерхностной плотности снежного покрова ρ_0 и средней по глубине 40–60 см ρ_s — в первом случае путем горизонтального заглубления стакана снегомера и во втором — путем вертикального заглубления. Для измерений выбраны произвольные точки в радиусе около 100 м от шурфов и не ближе 15 м друг от друга.

Помимо этого была определена зависимость плотности снежного покрова от глубины, для чего стакан снегомера заглубляли горизонтально в рабочую стенку шурфа через каждые 20 см до глубины 200 см включительно. Полученные значения усредняли с уче-

том поверхностной плотности снега ρ_0 и таким образом рассчитывали среднюю плотность по разрезу $\bar{\rho}_{200}$.

Результаты

В результате проведенных исследований построена карта средней толщины годовых слоев снежного покрова (рис. 3). Она составлена вручную, поскольку, по мнению авторов, имеющиеся алгоритмы компьютерных построений не дают достаточно корректной картины.

На основе полученных материалов можно сделать следующие выводы. Существует тенденция утолщения среднегодовых слоев снега в направлении с юга на север. Как показали гляциологические наблюдения в период 47-й РАЭ, аккумуляция в южной и северной частях озера отличается приблизительно вдвое [5]. В южной части средняя толщина годовых слоев по направлению к береговой черте явно увеличивается. В пределах озера она составляет 7,5 см и менее, за его пределами — 7,0 см и более, а в юго-западной части резко повышается до 8,5 см и более.

“Гребневая линия”, выражаясь языком геоморфологии, или линия локальных максимумов средней толщины годовых слоев, в генеральном плане повторяет фрагмент береговой черты подледникового оз. Восток (см. рис. 3). Это может свидетельствовать о резкой смене условий снегонакопления в районе наблюдений.

Выделяются два ярко выраженных простирания локальных минимумов (“килевые линии”) средней толщины годовых слоев диагонального направления (см. рис. 3). Одно из них в северо-западном направлении пересекает все озеро с азимутом около 135°. Согласно данным американских исследователей, линия тока ледника здесь имеет такое же направление [8]. Другое ярко выраженное простирание имеет азимут около 30° и пересекает озеро от его восточного борта приблизительно на две трети ширины.

Была построена также карта средней плотности снежного покрова по глубине 200 см (рис. 4). За пределами озера на исследованной территории она изменяется от 0,340 до 0,385 г/см³, а в его пределах — от 0,340 до 0,360 г/см³, причем максимум отмечается в районе линии налегания. Таким образом, плотность снежного покрова над подледниковым оз. Восток в целом ниже, чем вне этого озера. На рис. 4 прослеживается “килевая линия” приблизительно 45-градусного простирания, ортогональная ранее выделенной такой линии на карте средней толщины годовых слоев (см. рис. 3).

Мы построили карту удельной аккумуляции снежного покрова. Последняя была вычислена путем произведения средней плотности снежного покрова $\bar{\rho}_{200}$ на среднюю толщину годовых слоев (рис. 5). В целом эта карта согласуется с картой средней толщины годовых слоев (см. рис. 3). На ней также прослеживаются “гребневая линия”, соотносящаяся с линией налегания, и две “килевые линии” с азимутами простирания около 135 и 45°.

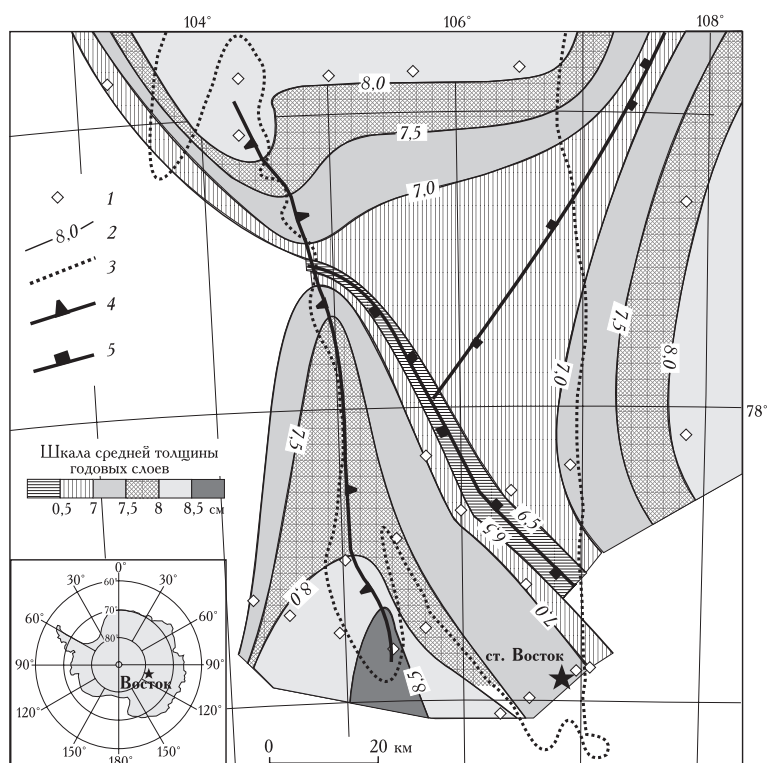


Рис. 3. Средняя толщина годовых слоев: 1 — положение шурфов, 2 — изолинии средней толщины годовых слоев, см, 3 — линия налегания, 4 — “гребневая линия”, 5 — “килевая линия”
Fig. 3. Average thickness of annual snow layers: 1 — snow pits, 2 — average thickness of annual snow layers, cm, 3 — grounding line, 4 — “ridge line”, 5 — “keel line”

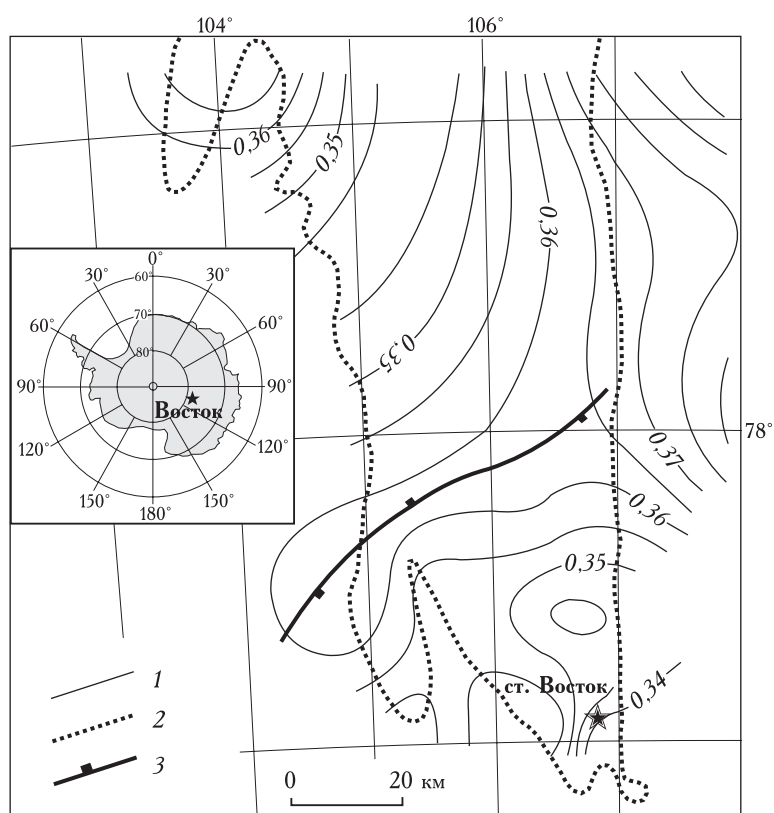


Рис. 4. Средняя плотность по глубине 200 см: 1 — изолинии плотности, г/см³, 2 — линия налегания, 3 — “килевая линия”
Fig. 4. Average snow density at 200-cm depth: 1 — density, g/cm³, 2 — grounding line, 3 — “keel line”

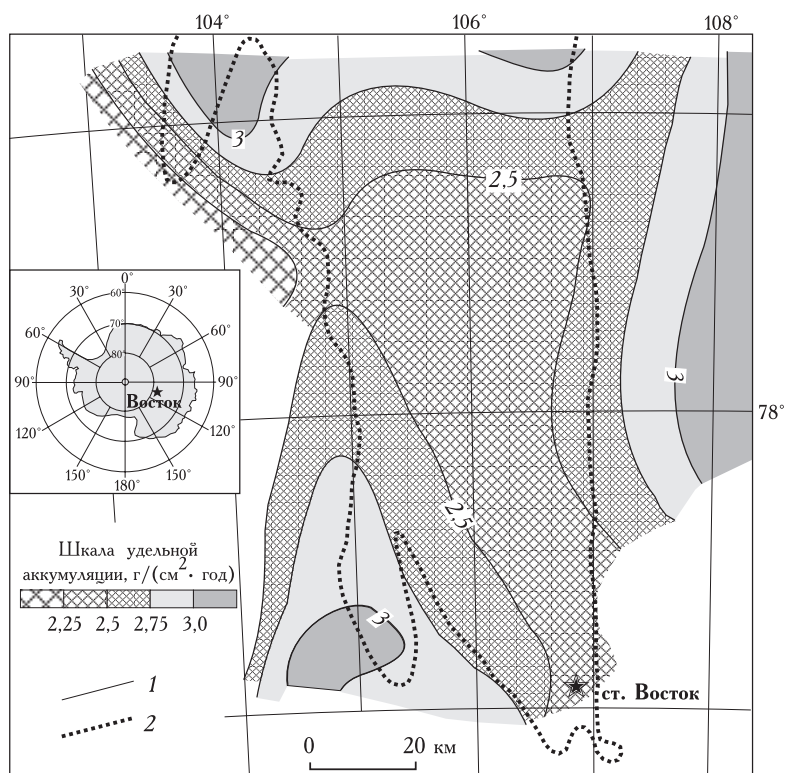


Рис. 5. Удельная аккумуляция снежного покрова: 1 — изолинии удельной аккумуляции, $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{год})$, 2 — линия налегания
 Fig. 5. Mean surface snow accumulation: 1 — accumulation contours in $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; 2 — grounding line

Разрезы по маршрутам, пересекающим подледниковое оз. Восток, приведены на рис. 6. Они демонстрируют согласное залегание годовых слоев, но при этом наблюдается локальное изменение их толщины и углов падения. Не будучи специалистами в

этой области, мы не беремся выдвигать какие-либо гипотезы, объясняющие столь сложную, на наш взгляд, картину.

В заключение авторы приносят благодарность механикам-водителям А.Г. Цывареву и В.А. Писклову,

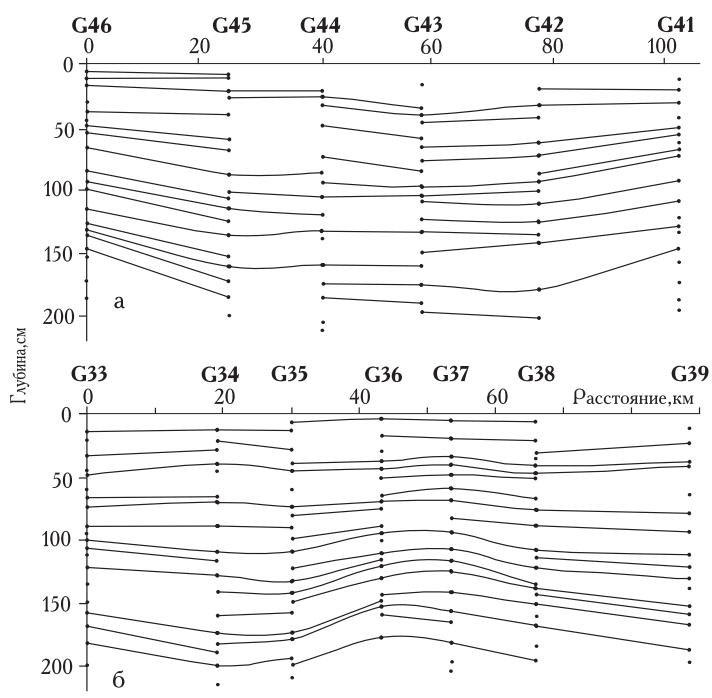


Рис. 6. Разрезы верхней части снежной толщи с расположением годовых слоев по профилям М-08 (а) и S47 (б) (см. рис. 1)
 Fig. 6. Snow sections with snow annual layers along the profiles M-08 (a) and S47 (b) (see location in Fig. 1)

а также А.В. Кузьменко и А.В. Сенаторову за всестороннюю помощь в научном походе, а также Н.В. Константинову за конструктивную критику и помощь в написании статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масолов В.Н., Лукин В.В., Попов С.В. и др. Основные результаты сейсмо-радиолокационных исследований подледникового озера Восток. — Разведка и охрана недр, 2002, № 9, с. 40-44.
2. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н. и др. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде. — Докл. АН, т. 379, № 5, 2001, с. 680-685.
3. Масолов В.Н., Попов С.В., Шереметьев А.Н. и др. Основные результаты первого этапа исследований подледникового озера Восток наземными дистанционными методами. — Научная конференция “Исследования и охрана окружающей среды Антарктики”, 13–15 ноября 2002 г. Тезисы докладов. СПб., 2002, с. 77-79.
4. Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н. Результаты наземных радиолокационных исследований подледникового озера “Восток” в 1998–2000 гг. — МГИ, вып. 89, 2000, с. 129-133.
5. Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н. и др. Основные результаты наземных радиолокационных исследований подледникового озера Восток в период 1998–2002 гг. — Гляциол. симпозиум “Будущее гляциосферы в условиях меняющегося климата”, Пушино, 2002, с. 9-10.
6. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М., “Мир”, 1985, 275 с.
7. Masolov V.N., Lukin V.V., Sheremetiev A.N. et al. Subglacial lake Vostok characteristics from Russian ground-based geophysical studies. — Eos, Trans. Amer. Geophys. Union, v. 83, № 19, Spreng Meet. Suppl., Abstract B21A-04, 2002.
8. Bell R.E., Studinger M., Tikku A.A. et al. Origin and fate of Lake Vostok water frozen to the base of the East Antarctic ice sheet. — Nature, v. 416, 2002, p. 307-310.

SUMMARY

In the period of 48 RAE (2002/03) measurements of snow cover density and mean accumulation in the southern part of the Vostok subglacial lake were fulfilled. As a result of treatment of materials distribution of the average thickness of annual snow cover layers, its density and dependence of the latter on depth were obtained. Maps of the average thickness of annual snow cover layers, its average density by the depth of 200 cm and mean accumulation were also compiled. It was determined that there is a tendency to thickening of average annual snow layers from south to the north. In the southern part of Vostok lake the average thickness of annual layers towards its walls distinctly increases. Two well manifested extensions of its local minimums are singled out, and one of them coincides with the direction of glacier's flow lines in this region. Snow cover density over Vostok lake is on the whole lower than outside. Map of the mean accumulation of snow cover on the whole correlates with the map of the average thickness of annual layers.