

## ВНУТРИЛЕДНИКОВЫЕ ИЗОХРОННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ В РАЙОНЕ ОЗЕРА ВОСТОК, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

С.В. ПОПОВ<sup>1</sup>, В.Я. ЛИПЕНКОВ<sup>2</sup>, В.В. ЕНАЛИЕВА<sup>1</sup>, А.В. ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> — Полярная морская геологоразведочная экспедиция

<sup>2</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

*Данные радиолокационного профилирования (РЛП), полученные специалистами Полярной морской геолого-разведочной экспедиции в 1998–2005 гг., использованы для изучения слоистости Антарктического ледникового покрова в районе подледникового озера Восток. Трассирование внутренних слоев, датированных по керну станции Восток, и экстраполяция возрастной шкалы керна на северные районы озера осуществлялись по временным радиолокационным разрезам. Установленные таким образом глубины залегания разновозрастных слоев в северной части озера Восток хорошо согласуются с независимыми данными моделирования ледникового покрова для этого района.*

### ВВЕДЕНИЕ

Озеро Восток — самое крупное из известных подледниковых озер Антарктиды. По своей площади (около 17,1 тыс. км<sup>2</sup> [7]) оно сопоставимо с крупнейшим в Европе Ладожским озером. Начиная с летнего полевого сезона 44-й РАЭ (1998/99 г.) специалисты Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ) проводят в районе озера Восток работы по радиолокационному профилированию (РЛП) ледника. Общая протяженность маршрутов РЛП, выполненных к 2005 г., превышает 4000 км (рис. 1). В результате этих крупномасштабных полевых работ было завершено картирование береговой черты озера, построены уточненные карты подледного рельефа и мощности перекрывающего озеро ледникового щита в пределах изученной территории [4, 6, 7, 12, 15]. Большой интерес вызвали также попытки изучения стратификации антарктического ледникового покрова по радиолокационным данным [2, 3, 5, 8, 9, 20]. Они базируются на представлении о внутренних рефлекторах как изохронных поверхностях в теле ледникового покрова. Дополнительные данные, свидетельствующие в пользу такого представления, были получены в результате детального сопоставления записи амплитуды отраженного сигнала с результатами изучения строения и состава льда в разрезе ледникового покрова, вскрытого глубокой скважиной 5Г-1 на станции Восток [2]. Проведенное исследование, в частности, показало, что в верхней части разреза ледниковой толщи (до глубины 100–200 м) изменения диэлектрической проницаемости в основном связаны с увеличением плотности ледяной породы с глубиной. В средней части разреза ее вариации, главным образом, определяются изменениями кислотности (и, следовательно, электропроводности) льда, которые, в свою очередь, связаны с эволюцией химического состава атмосферы в ходе глобальных климатических изменений, а также с эпизодическим выпадением осадков, содержащих продукты вулканических извержений [11, 14]. В то же время в самых глубоких частях ледника, где под воздействием деформаций резко возрастает анизотропность строения ледяной породы, отчетливо проявляется зависимость интенсивности отраженного сигнала от характеристик петрографической структуры льда [10, 13]. Последнее особенно ярко выражено в районе станции Восток, для которого характерно развитие зон сдвиговых деформаций, приуроченных к слоям ледяных тектонитов с преимущественно вертикальной ориентировкой главных кристаллографических осей зерен льда [1].

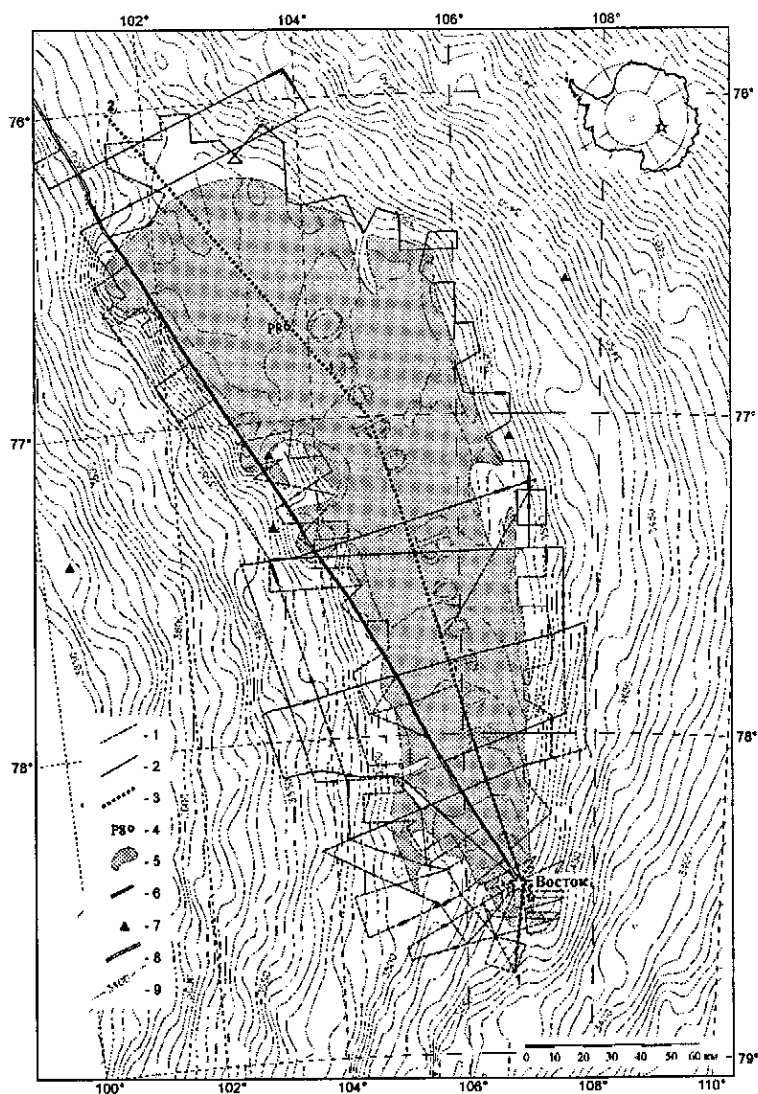


Рис. 1 Схема расположения маршрутов радиолокационного профилирования в районе подледникового озера Восток:

1 – маршруты РЛП 1998–2005 гг.; 2 – маршруты, использованные для трассирования внутренних слоев; 3 – профиль 1–2; 4 – пункт P8; 5 – наиболее вероятное положение подледникового озера Восток; подледниковые водоемы: 6 – выявленные в ходе работ 1998–2005 гг.; 7 – в ходе ранних исследований [17]; 8 – положение трассы следования санно-гусеничного похода обс. Мирный – ст. Восток; 9 – изогипсы дневной поверхности в метрах [16]; сечение изогипсов 5 м

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Основу настоящего исследования составляют материалы наземного радиолокационного профилирования полученные в ходе полевых работ Полярной морской геологоразведочной экспедиции в районе озера Восток в период с 1998 по 2005 г. [4, 6, 7, 12]. Положение радиолокационных маршрутов приведено на рис. 1.

В задачу исследования входило прослеживание (трассирование) поверхностей внутреннего отражения (изохронных поверхностей), которые пересекают скважину 5Г-1, вдоль маршрутов РЛП, охватывающих территорию озера Восток. Определение пространственного положения изохронных поверхностей в теле ледникового покрова позволяет получить информацию, необходимую для проверки моделей течения ледника, а также экстраполировать датировки ледяных кернов на районы, удаленные на значительные расстояния от точек глубокого бурения льда.

Методически указанная работа выполняется следующим образом. Начальный этап предусматривает выявление и оцифровку наиболее контрастных слоев на выбранных временных радиолокационных разрезах. Маршруты РЛП выбираются таким образом, чтобы они охватывали значительную часть изучаемой территории (озеро Восток) и, за счет точек пересечения, образовывали единую замкнутую сеть (рис. 1), позволяющую производить анализ невязок и оценивать суммарную погрешность всей процедуры трассирования (до 50 м). Трассирование и оцифровка отражающих внутренних слоев вдоль выбранных радиолокационных маршрутов осуществляются визуально. Основными критериями выделения слоев являются: максимальная протяженность и максимальная контрастность, а также совпадение глубинных отметок слоев в районе скважины 5Г-1 с положением реперных горизонтов, выделенных в результате корреляции амплитудной радиолокационной записи с результатами изучения состава и строения ледяного керна [2]. На заключительном этапе работы протрассированные слои одного возраста интерполируются на регулярную сеть (гридируются) с целью построения и анализа карт их пространственного положения в леднике.

В ходе выполненной нами работы были выделены и уверенно протрассированы четыре наиболее контрастные поверхности внутреннего отражения. Эти поверхности пересекают скважину 5Г-1 на станции Восток на глубинах 600, 1060, 1900 и 2180 м и, согласно общепринятой временной шкале «восточного» керна [19], соответствуют возрастам 34,8, 73,0, 131,1 и 160,4 тыс. лет (см. рис. 2). Карты

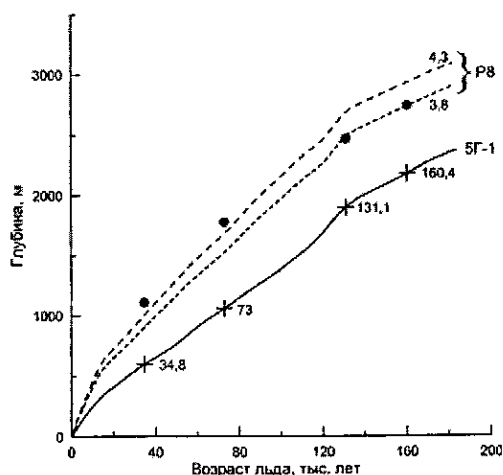


Рис. 2 Глубина залегания изученных изохронных поверхностей (рефлекторов) в районе скважины 5Г-1 (крестики) и в точке Р8 (кружки) в северной части озера Восток (см. карту на рис. 1).

Сплошной линией показана общепринятая временная шкала керна глубокой скважины [19], пунктирными линиями — предварительные расчеты возраста льда для пункта Р8 при двух значениях современной аккумуляции в этой точке (неизвестна) — 3,8 и 4,3 см льда в год [18]

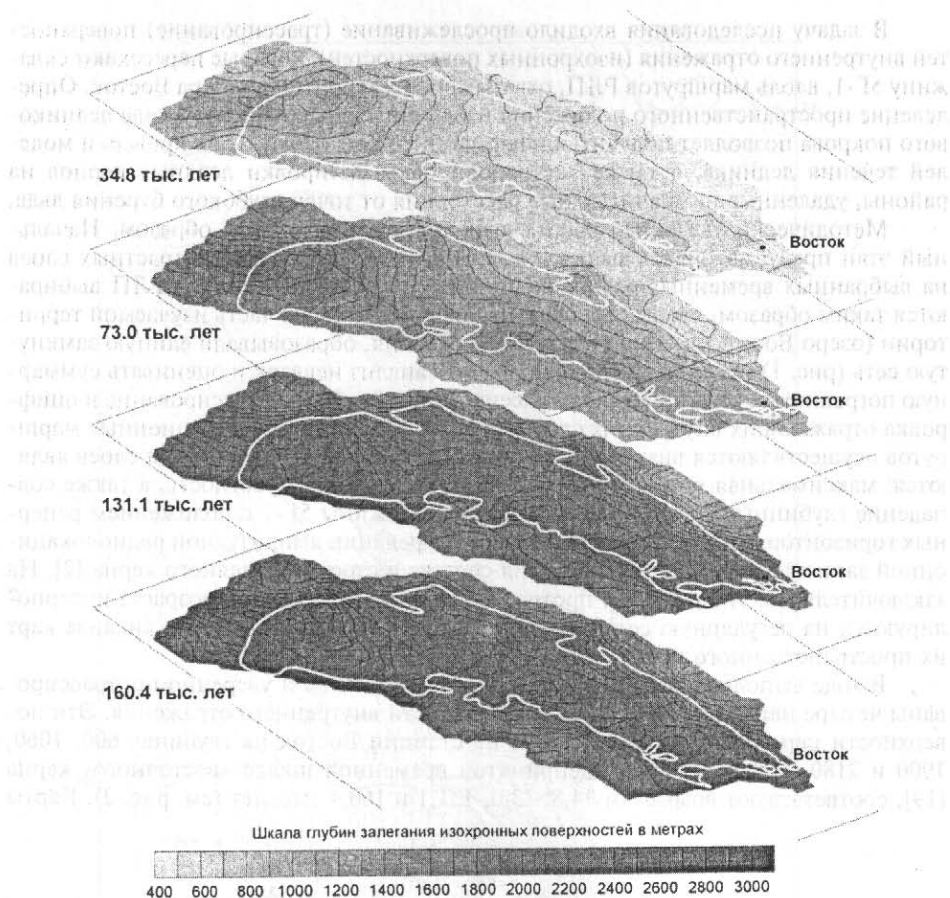


Рис. 3. Карты глубин залегания изохронных поверхностей, датированных возрастами 34,8, 73,0, 131,1 и 160,4 тыс. лет

глубин залегания указанных изохронных поверхностей на территории озера Восток представлены на рис. 3.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Проследим изменение глубины залегания изученных изохронных поверхностей вдоль длинной оси подледникового озера Восток по профилю 1—2, общая протяженность которого составляет 340 км (рис. 1). Данными РЛП обеспечен лишь 140-километровый южный участок профиля. Информация о положении изохрон в северной части озера целиком базируется на результатах интерполяции (гридирования) данных, полученных по береговым радиолокационным профилям, а также на данных, полученных в точках пересечения выбранного нами профиля 1—2 с пятью пересекающими озеро радиолокационными маршрутами (рис. 4). Для пунктов пересечений на рис. 4 приведены амплитудные радиолокационные записи, морфологический анализ которых подтверждает подобие формы сигнала, соответствующего отдельным изохронным поверхностям в каждой из пяти точек пересечений. Положение зеркала озе-

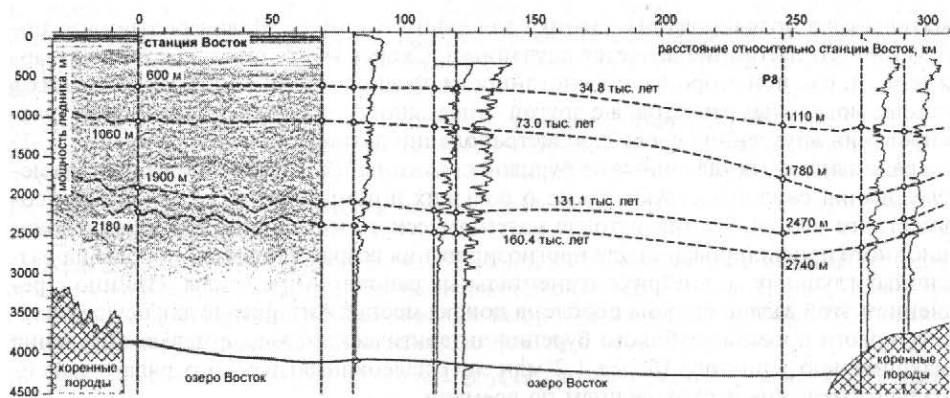


Рис. 4. Результаты определения пространственного положения изохронных поверхностей вдоль профиля 1–2.

В левой части профиля показаны результаты трассирования слоев по данным обработки радиолокационных временных разрезов, в правой — результаты интерполяции (гридирования) данных, полученных на ближайших маршрутах РЛП и в точках пересечения профиля 1–2 с поперечными маршрутами РЛП, которые обозначены вертикальными линиями. Пункт Р8 — точка, для которой выполнены модельные расчеты возраста льда [18]. Для точек пересечения даны также записи амплитуды радиолокационного сигнала, которые показывают резкие изменения интенсивности сигнала на горизонтах, соответствующих выбранным изохронным поверхностям. Расстояние по профилям отсчитывается от скважины 5Г-1

ра Восток нанесено по данным сейсмических исследований [4]. Сопоставим установленные нами (экспериментальные) значения глубин выделенных изохронных поверхностей с результатами теоретических оценок возраста льда в пункте Р8.

Предварительные расчеты возраста льда в данной точке выполнялись с помощью модели тепло-массопереноса в леднике и упрощенной модели растекания льда [18]. Мощность ледника в этом районе составляет 4200 м [4]. В основу расчетов были положены предположения о сбалансированности массообмена между озером и перекрывающим его ледником, а также о равенстве площадей зон таяния и намерзания в системе озера Восток. Климатические вариации на поверхности задавались по результатам палеоклиматической реконструкции для района станции Восток. Поскольку истинное значение скорости аккумуляции льда в данном районе неизвестно, в расчетах использовались два вероятных (граничных) значения: 3,8 и 4,3 см льда в год.

Результаты математического моделирования [18] показали, что возраст льда в точке Р8 на глубине 3350 м составляет порядка 215 тыс. лет, что в два раза меньше возраста льда (435 тыс. лет) на той же глубине, в районе станции Восток. Это означает, что изохронные поверхности над озером Восток погружаются при движении с юга на север на несколько сот метров, копируя, в самых общих чертах, тенденции изменения глубины залегания ледяной кровли озера. Последнее утверждение полностью подтверждается результатами анализа радиолокационных данных, представленных на рис. 3 в виде карт глубин залегания четырех изохронных поверхностей и на рис. 4 в виде разреза ледника по профилю 1–2.

Результаты расчетов возраста в пункте Р8 для двух указанных значений аккумуляции приведены на рис. 2. На этом же рисунке кружками показаны глубины залегания (1110, 1780, 2470 и 2740) в этой точке изохронных поверхностей, датированных возрастами 34,8; 73,0; 131,1 и 160,4 тыс. лет. В целом отмечается весьма хорошее совпадение результатов нашего анализа с независимыми данными мате-

математического моделирования ледника для данного района. Маловероятно, что полученное согласование является случайным. Скорее всего, оно является подтверждением, с одной стороны, обоснованности предположений и оценок, лежащих в основе модельных расчетов, а с другой — надежности предложенного метода трассирования внутренних слоев для экстраполяции датировок ледяного керна (5Г-1) на районы, весьма удаленные от буровой скважины. Результаты проведенного исследования свидетельствуют также о больших потенциальных возможностях совместного использования методов математического моделирования и радиолокационного профилирования для прогнозирования возраста ледяной породы на различных глубинах во внутриконтинентальных районах Антарктиды. Именно с решением этой задачи связана проблема поиска места в Антарктиде для осуществления нового проекта глубокого бурения антарктического льда с целью получения максимально длинного (более 1,2 млн лет) палеоклиматического ряда с максимально возможным разрешением по времени.

*Работа выполнялась в рамках проекта 4 подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан» при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 06-05-64967).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липенков В.Я., Полякова Е.В., Дюваль П., Преображенская А.В. Особенности строения антарктического ледникового покрова в районе станции Восток по результатам петроструктурных исследований ледяного керна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 76. С. 68–77.
2. Мандрикова Д.В., Липенков В.Я., Попов С.В. Строение ледникового покрова в районе озера Восток (Восточная Антарктида) по данным радиолокационного профилирования // Мат-лы гляциол. исслед. 2005. Вып. 98. С. 65–72.
3. 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) // Труды XX и XXI Всерос. симп. «Радиолокационное исследование природных сред» / Науч. ред. Маров М.Н., Степаненко В.Д., Мельник Ю.А., Иванов В.Г. (ВКА им. Можайского). 2003. Вып. 3. С. 71–78.
4. 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.
5. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
6. 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. // Мат-лы гляциол. исслед. 2003. Вып. 94. С. 187–193.
7. Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н., Лукин В.В. Береговая черта подледникового озера Восток и прилегающие водоемы: интерпретация данных радиолокационного профилирования // Мат-лы гляциол. исслед. 2005. Вып. 98. С. 73–80.
8. Bell R.E., Studinger M., Tikku A.A., Clarke G.K.C., Gunter M.M., Meertens C. Origin and fate of Lake Vostok water frozen to the base of the East Antarctic ice sheet // Nature. 2002. Vol. 416. P. 307–310.
9. Eisen O., Nixdorf U., Wilhelms F., Miller H. Age estimates of isochronous reflection horizons by combining ice core, survey, and synthetic radar data // Journal of Geophysical Research. 2004. № B04106. P. 109. doi:10.1029/2003JB002858.
10. Fujita S., Matsuoka T., Ishida T., Matsuoka K., Mae S. A summary of the complex dielectric permittivity of ice in the megahertz range and its applications for radar sounding of polar ice sheet // Physics of Ice Core Records. Hokkaido University Press. Sapporo, 2000. P. 185.
11. Fujita S., Maeno H., Uratsuka S., Furukawa T., Mae S., Fujii Y., Watanabe O. Nature of radio-echo layering in the Antarctic ice sheet detected by two-frequency experiments // Journal of Geophysical Research. 2002. № B06104. P. 13013–13024.

12. 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 / Fütterer D.K., Damaske D., Kleinschmidt G., Miller H., Tessensohn F. eds. // *Antarctica Contributions to Global Earth Sciences*, Springer Berlin Heidelberg. New York, 2006. P. 135–140.
13. Matsuoka K., Furukawa T., Fujita S., Maeno H., Uratsuka S., Naruse R., Watanabe O. Cristal orientation fabrics within the Antarctic ice sheet revealed by a multipolarization plane and dual-frequency radar survey // *JGR*. 2003. Vol. 108. № B10. P. 2499. doi: 10.1029/2003JB002425.
14. Millar D.H.M. Radio-echo layering in polar ice sheets and past volcanic activity // *Nature*. 1981. Vol. 292. P. 441–443.
15. 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 / D.K.Fütterer, D. Damaske, G.Kleinschmidt, H.Miller and F.Tessensohn eds. New York, 2006. P. 141–146.
16. 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. J. Int.* 1999. Vol. 139. P. 645–656.
17. Robin G.D., Evans Q.S., Bailey J.T. Interpretation of radio echo sounding in polar ice sheets // *Philos. Trans. R. Soc. London*, 1969. Vol. 146, Ser. A. P. 437–505.
18. Salamatina A.N., Petit J.R., Lipenkov V.Ya. An estimate of LV isolation time from a sensitivity experiment for the melting area. *Geophysical Research Abstracts* (EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, April, 2003), European Geophysical Society. Vol. 5. Abstract № 08277, 2003.
19. Salamatina A.N., Tsyganova E.A., Lipenkov V.Ya., Petit J.R. Vostok (Antarctica) ice-core time-scale from datings of different origins // *Annals of Glaciology*. 2004. Vol. 39. P. 283–292.
20. 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*. 1998. № 27. P. 360–364.

*S.V.POPOV, V.YA.LIPENKOV, V.V.ENALIEVA, A.V.PREOBRAZHENSKAYA*

## INTERNAL ISOCHRONOUS LAYERS IN THE ICE SHEET ABOVE LAKE VOSTOK, EAST ANTARCTICA

*Radio-echo sounding (RES) data collected by Polar Marine Geological Research Expedition in 1998–2005 are used to investigate internal structure of the Antarctic ice sheet over the vast area of subglacial Lake Vostok. Using RES imageries we trace internal layers (isochrones) and extrapolate the Vostok ice-core time-scale to the northern part of the lake. The depths of the dated layers are found in agreement with independent information from ice-flow modeling.*