

УДК 551.24.05

О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ КОТЛОВИНЫ ВОСТОК (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) ПО МАТЕРИАЛАМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2009 г. Э. В. Исанина¹, Н. А. Крупнова¹, С. В. Попов², В. Н. Масолов², В. В. Лукин³

¹Российский геоэкологический центр филиала “Урангео”
195197, Санкт-Петербург, Кондратьевский просп., д. 40, корп. 13

²Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ПМГРЭ),
198412, Санкт-Петербург, г. Ломоносов, ул. Победы, д. 24

³Российская Антарктическая Экспедиция (РАЭ), 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

Поступила в редакцию 19.08.2008 г.

В период с 7 декабря 2002 г. по 23 января 2003 г. (сезон 48 РАЭ) в южной части под-ледникового озера Восток выполнялись сейсмологические наблюдения методом обменных волн землетрясений с целью изучения особенностей строения земной коры. Было выставлено три пункта наблюдений. Один из них располагался на станции Восток, два других находились на удалениях 8.7 и 12.02 км к востоку и западу от станции. В результате проведенных исследований выявлено, что в указанном районе мощность земной коры составляет 34–36 км. Она подразделяется на 3 блока различных рангов. Один из них располагается непосредственно под котловиной Восток и характеризуется пониженной скоростью распространения сейсмических волн. В земной коре выявлено 7 границ обмена. Полученные данные позволяют предположить увеличение геотермального потока в районе котловины Восток и к востоку от нее. Обнаружена сейсмическая расслоенность ледникового покрова, которая коррелирует с данными радиолокационного профилирования и строением ледника по данным керн скважины 5Г-1. Границы в толще ледника в районе станции Восток располагаются на глубинах 700 ± 100 м, 1600 ± 100 м и 2200 ± 100 м.

ВВЕДЕНИЕ

В центральной части Восточной Антарктиды в начале 1990-х годов в результате анализа данных спутниковой альтиметрии [18] было обнаружено обширное подледниковое озеро. Оно располагается в районе российской станции Восток. С 1995 г. наша страна проводит комплексные наземные геофизические исследования в этом районе. Они включают в себя радиолокационное профилирование и сейсмические зондирования МОВ [5, 6, 14, 15]. Изучение этого уникального природного феномена привлекает научную общественность ввиду того, что озеро Восток является самым большим из известных подледниковых водоемов [5, 7]. Кроме того, здесь, начиная с 1970 г., осуществляется бурение ледника с отбором керн. На настоящий момент забой скважины 5Г-1 располагается менее чем в 100 м от поверхности озера. Изучение этого природного феномена является одной из национальных программ, осуществляемых в рамках Международного Полярного Года, и весомым вкладом российских ученых в изучение Центральной Антарктиды.

Отечественные геофизические исследования привели к достаточно детальному освещению вопросов морфологии коренного рельефа котловины Восток и ее бортов [16], что явилось первым

этапом в изучении строения этой территории. Вторым шагом на пути к пониманию его глубинного строения стало выполнение сейсмологических исследований в этом районе, чему и посвящена настоящая работа.

Метод обменных волн от землетрясений (МОВЗ) используется в отечественной и зарубежной геофизике с 1964 г. Он зарекомендовал себя незаменимым при изучении глубинного строения земной коры [1, 2, 8, 9, 14]. Метод основан на регистрации и последующей интерпретации проходящих обменных волн PS типа, т.е. продольных волн (P), трансформированных в поперечные (S) на границах раздела сред. Принципиальное преимущество использования обменных волн от далеких землетрясений состоит в том, что они распространяются от подошвы земной коры к точке приема по направлениям, близким к вертикальным (т.е. углы падения на границу обмена не превышают 15°). Это, в свою очередь, приводит к незначительным (от 200–500 м для верхней коры и 6–9 км для нижней) величинам сейсмического сноса, в отличие, например, от метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ).

Основной задачей МОВЗ является получение данных о конфигурации сейсмических границ и блоков в земной коре и верхней мантии непосред-

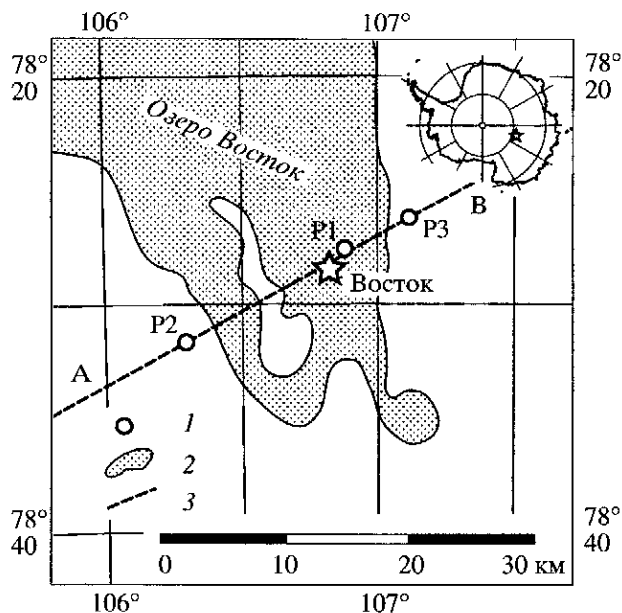


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений МОВЗ

1 – пункты наблюдений; 2 – зеркало озера Восток; 3 – положение профиля АВ

ственно под пунктом наблюдения. Для преобразования временного разреза в глубинный и определения сейсмических сносов необходимы скоростные характеристики среды. Они могут быть получены несколькими способами, включая проведение специальных взрывных работ или используя данные ГСЗ. Последний представляется наиболее предпочтительным.

Основной особенностью волнового поля МОВЗ является получение данных об обменоспособности среды, которая характеризует относительную интенсивность обменных волн [8, 9]. Она, в свою очередь, характеризует динамическое состояние среды. По аналогии с сейсморазведкой выделяются “сильные” и “слабые” поверхности обменов. Разрезы обменно-способности иллюстрируют наличие структурного узора, который и принято именовать мозаично-блоковым. Необходимо отметить, что помимо глубинного положения границ, по интенсивности волн можно судить об их динамическом и физическом состоянии (например, степени трещиноватости и напряженности), а также об изменении указанных параметров по латерали. Ввиду того, что МОВЗ является пассивным методом исследования, это дает значительные преимущества, по сравнению с активными сейсмическими методами, такими, как МОВ или ГСЗ. Во-первых, он существенно дешевле последних, и, во-вторых, при проведении работ не происходит загрязнения окружающей среды.

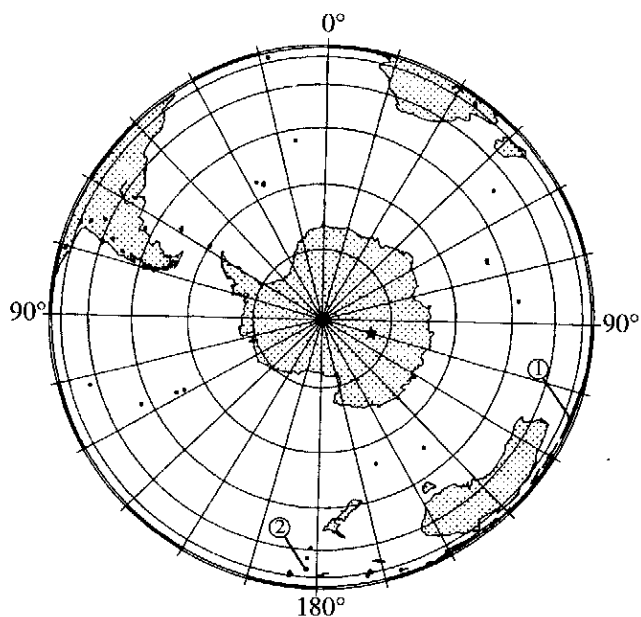


Рис. 2. Схема расположения эпицентров землетрясений

1 – землетрясение произошедшее 27.12.02 в 13:40; 2 – землетрясение произошедшее 04.01.03 в 05:25. Время по Гринвичу

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сейсмологические исследования в районе озера Восток в течение летнего полевого сезона 48 РАЭ (2002/03 гг.) были сосредоточены на профиле АВ, проходящем через забой скважины 5Г-1 (рис. 1). Наблюдения проводились в период с 7 декабря 2002 г. по 23 января 2003 г. на трех пунктах. Один из них (P1) располагался на станции Восток, а два других на восточном (P3) и западном (P2) бортах котловины озера на удалениях 8.7 и 12.02 км соответственно (см. рис. 1). Регистрация осуществлялась на трехкомпонентную цифровую сейсмостанцию “Дельта-Геон-02” с мгновенным динамическим диапазоном 115 дБ. Цель работ состояла в выявлении особенностей строения земной коры южной части озера Восток.

Источниками волн для МОВЗ являются естественные землетрясения. Волны подходят из различных мест нашей планеты с различными азимутами, и, в конечном итоге, на каждой сейсмологической станции формируется трехмерная модель строения земной коры. В течение 48 суток было зарегистрировано 353 сейсмоявления, эпицентры большей части которых располагались в южном полушарии (рис. 2). Их идентификация производилась по каталогу IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology). На рис. 3 представлена роза-диаграмма направлений подходов волн к регистраторам. Представленные материа-

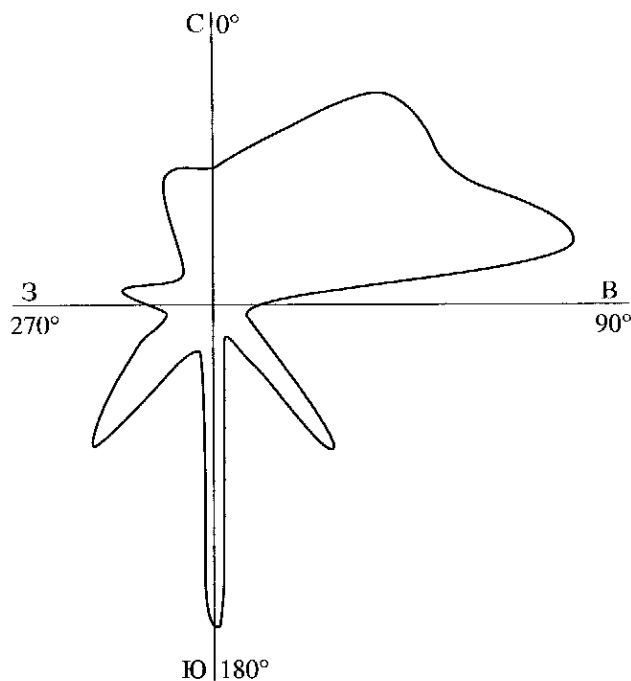


Рис. 3. Распределение землетрясений по азимутам подхода

лы показывают, что даже столь короткого периода наблюдений вполне достаточно для формирования трехмерной модели строения земной коры по профилю. На рис. 4 и 5 представлены типовые записи далеких землетрясений. Положение их эпицентров приведено на рис. 2.

Скоростная модель для формирования глубинного разреза выбиралась, исходя из общих представлений о строении земной коры антарктического континента, а также данных ГСЗ, полученных в районе ледника Ламберта (Восточная Антарктида) [13]. Для ее верхней части использовались материалы, полученные в ходе радиолокационных и сейсмических исследований на озере Восток [5, 17]. Средняя скорость и число слоев в коре определялось по данным МОВЗ. Далее, методом последовательных приближений выполнялось решение прямой и обратной задачи вплоть до минимизации расхождения всех известных параметров.

Обменоспособность среды является характеристикой динамического состояния земной коры. Она может быть связана как с наличием различной акустической жесткости на контактах, так и с проявлением различных видов ее напряженного состояния, таких, как растяжения или сжатия [8, 11].

На рис. 6 представлен глубинный разрез земной коры, ее обменоспособности в районе станции Восток. Как видно из рисунка, в районе работ отчетливо выявляются два блока: “западный” (I) и “восточный” (II). Они разделены сквозькоровой

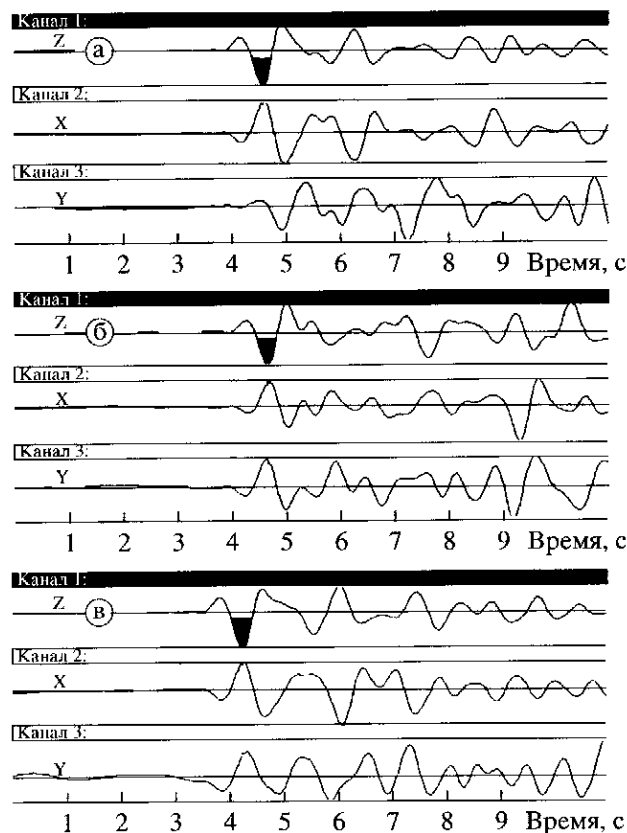


Рис. 4. Запись землетрясения, произошедшего 27.12.02 в 13:40 а – пункте P2; б – в пункте P1; в – в пункте P3

зоной нарушений, граница которой уверенно прослеживается до 50 км. Указанное деление подтверждается изменением мощности земной коры от 34 км в “западном”, динамически более стабильном жестком блоке (об этом свидетельствует меньшая интенсивность значений обменоспособности среды) до 36 км в “восточном”. В последнем обнаружен блок более высокого ранга названный “озерным” (IIa). Он характеризуется пониженной скоростью распространения волн и повышенной расслоенностью в верхней (до 5 км) части разреза. Зона нарушений, отделяющая его от “восточного” блока, прослеживается в верхней части земной коры до глубины примерно 20 км.

На рис. 4 представлена запись одного из сейсмоявлений с азимутом подхода $\alpha = 351$ (т.е. есть фронт волн, приблизительно параллельный линии профиля). В пункте P1 (рис. 4б) время регистрации продольной волны самое позднее. Это свидетельствует об уменьшении средней скорости распространения волн в земной коре под котловиной Восток, что и является одной из причин для выделения “озерной” зоны в обособленный динамический блок.

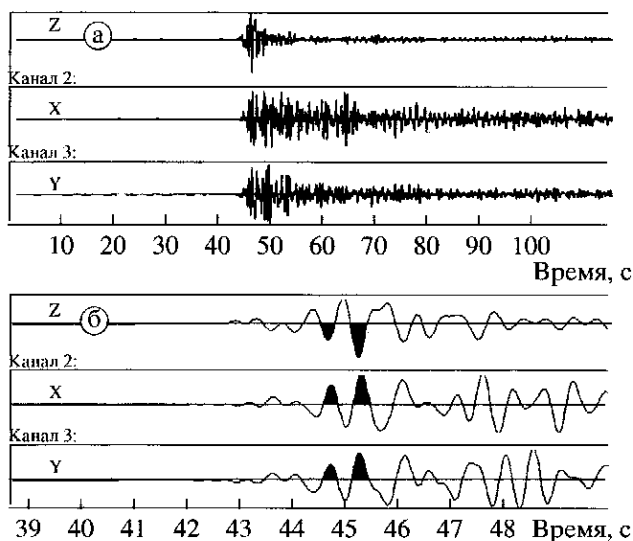


Рис. 5. Запись землетрясения, произошедшего 04.01.03 в 05:25

а – полная запись; б – укрупненный фрагмент

В земной коре изучаемого района по обменным волнам уверенно выявляется 7 границ. Таким образом, можно предположить, что она мало отличается по глубинному строению от земной коры других континентов, где при средней мощности 34–36 км насчитывается от 5 до 7 границ [2, 8, 9, 13, 14].

На глубинах 3.8–5.0 км выделяется последняя в верхней коре граница. По ее динамической выразительности и общности частотных характеристик авторы предварительно относят ее к границе кристаллического фундамента. В пунктах P1 и P3 она раздваивается, под ней образуется слой мощностью от 400 м до 1 км (см. рис. 6). В “западном” блоке свойства фундамента иные. В нем верхняя граница расположена на глубине 3500 ± 200 м. Она шероховата, но не расслоена. Несмотря на относительно небольшой объем имеющихся данных, можно допустить, что в пунктах P1 и P3 верхняя граница сложена осадочными породами, а нижняя соответствует кровле кристаллического фундамента. Для более обоснованных выводов требуется выполнение наблюдений большей длительности.

Немаловажным результатом работ является тот факт, что под озером Восток на глубинах 55–60 км в верхах мантии выделена локальная область геопространства, которая характеризуется высокими значениями обменоспособности и повышением скорости (см. рис. 6). При проведении исследований Europrobe в 1996–2000 гг. по программе Svekalapko Research было установлено, что к таким областям тяготеют верхнемантийные плюмы [12]. Из этого следует, что в указанном районе возможно наличие повышенного гео-

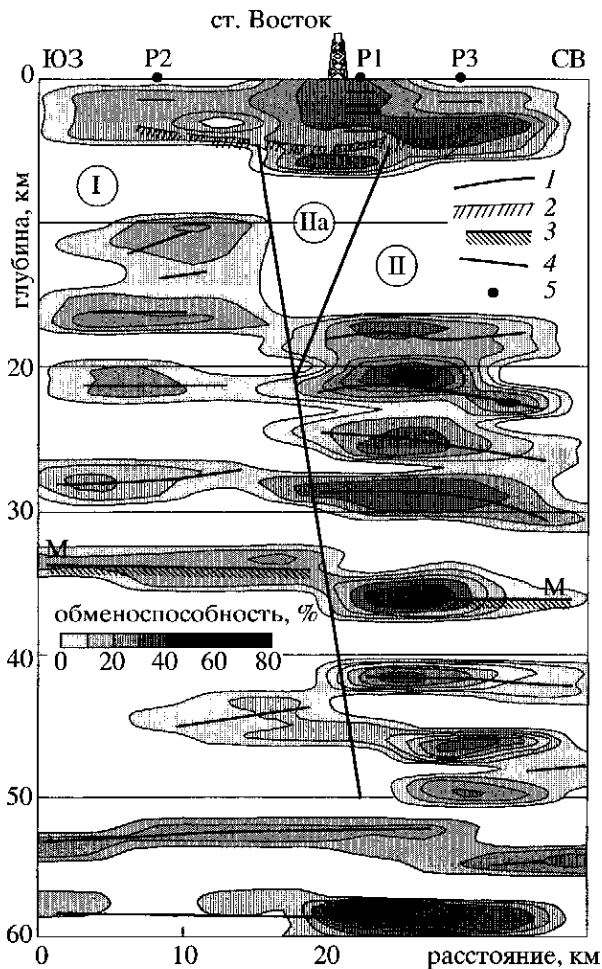


Рис. 6. Разрез земной коры

1 – границы; 2 – фундамент (В); 3 – граница Мохо (М); 4 – глубинные разломы; 5 – пункты наблюдений

термального потока, и тепловые флюиды по трансковровому разлому устремляются в земную кору. Кроме того, в “восточном” блоке наблюдается повышение обменоспособности по сравнению с “западным”. Указанное обстоятельство также можно трактовать как увеличение геотермального потока в этой области. Наличие таких признаков, как падение скорости, клиновидный опущенный блок и верхнемантийный плюм, позволяют предположить, что котловина Восток может иметь рифтогенную природу. Она образована, вероятнее всего, до начала гляциации Антарктиды (т.е. в доолигоценное время), так как зоны нарушений не прослежены выше фундамента. Кроме того, по характеру обменоспособности можно предположить, что “восточный” блок находится в растянутом состоянии, в то время как “западный” испытывает деформации сжатия.

Обращает на себя внимание, что во всех трех пунктах наблюдений выявлены обменные волны, соответствующие границам раздела в толще лед-

ника (см. рис. 6). Ледниковый покров в пункте Р1 дифференцирован гораздо сильнее (3 границы), чем в остальных, на которых выявляется только одна граница. Под станцией Восток они прослежены на глубинах 700 ± 100 м, 1600 ± 100 м и 2200 ± 100 м. В пунктах Р2 и Р3 глубина залегания составляет 1450 ± 100 и 1550 ± 100 м соответственно.

Ввиду того, что указанные границы не прослеживаются на сейсмограммах МОВ, есть основания полагать, что они связаны не с изменением акустической жесткости, а с наличием т.н. “нежесткого” контакта пород. Практически это означает, что образовавшиеся обменные волны могут быть связаны со структурными изменениями. Согласно данным о строении ледника по материалам кернового бурения скважины 5Г-1, до глубины 700 м происходит его перекристаллизация с укрупнением кристаллов льда. Ниже указанной глубины наблюдается их полигонизация [3]. Глубинам 1600 и 2200 м соответствует резкое увеличение содержания микрочастиц [3]. Кроме того, на глубинах 580 и 2150 м имеются наиболее контрастные слои, выявляемые по радиолокационным данным [4, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе сейсмологических исследований, проведенных в районе станции Восток была:

1. инструментально определена мощность земной коры, составившая 34–36 км;
2. выявлена область понижения скорости распространения сейсмических волн, располагающаяся под котловиной Восток;
3. установлена слоисто-блоковая структура земной коры с дифференциацией по динамическим признакам;
4. под озером Восток на глубинах 55–60 км обнаружена область повышенной обменоспособности среды, что может свидетельствовать об увеличении геотермального потока в районе котловины Восток и к востоку от нее;
5. обнаружена сейсмическая расслоенность ледникового покрова.

В заключении авторы благодарят Попкова А.М. за помощь в проведении полевых наблюдений. Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 07-05-00401).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Е.И., Гальперина Р.М., Фролова В.А., Эренбург М.С. Волновые поля в методе обменных волн землетрясений. М.: РФИ ОИФЗ, 1995, 192 с.
2. Золотов Е.Е., Костюченко С.Л., Ракитов В.А., Кадури И.Н. Глубинное строение литосферы Восточно-Европейской платформы по результатам сейсмологических наблюдений // Разведка и охрана недр. 1998. № 2. С. 11–13.
3. Липенков В.Я., Барков Н.М., Саламатин А.Н. История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного керна со станции Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2000. Вып. 72. С. 173–230.
4. Мандрикова Д.З., Липенков В.Я., Попов С.В. Строение ледникового покрова в районе озера Восток (Восточная Антарктида) по данным радиолокационного профилирования // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 65–72.
5. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Докл. АН. 2001. Т. 379. Вып. 5. С. 680–685.
6. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Современные отечественные сейсморadiолокационные 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.
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 // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 73–80.
8. Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы: Баренц регион // Ред. Ф.П. Митрофанова, Н.В. Шарова. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. 237 с.
9. Строение литосферы Балтийского щита // Ред. Н.В. Шарова. М.: Нац. геоф. ком. РАН, 1993. 166 с.
10. Цыганова Е.А., Попов С.В., Саламатин А.Н., Липенков В.Я. Моделирование течения льда через станцию Восток на основе данных радиолокационного профилирования // Симпозиум “Гляциология в канун Международного Полярного Года”, Пушкинские Горы, 9–12 октября 2006 г. С. 8.
11. Яновская Т.Б., Дмитриева Л.А. Влияние нежесткости контакта упругих сред на коэффициент отражения, преломления и обмена // Изв. АН. СССР. Физика земли. 1991. № 2. С. 17–22.
12. EUROPROBE 1992–2000. Lithosphere Dynamics. Origin and Evolution of Continents.
13. Fedorov L.V., Grikurov G.E., Kurinin R.G., Masolov V.N. Crastal structure of the Lambert glacier area from geophysical data // Symposium on Antarctic Geology and Geophysics. Madison, Wisconsin, USA, August 22–27, 1977, 1982. P. 931–936.
14. Isanina E.V., Verba M.L., Ivanova N.M., Kazansky V.I., Sharov N.V. Deep structure and seismogeological boundaries of the Pechenga District in the Baltic Shield and the adjacent part of the Barents Sea shelf plate // Geology of Ore Deposits. 2000. Vol. 42. No 5. P. 429–439.
15. Masolov V.N., Popov S.V., Lukin V.V., Sheremet'ev A.N., Popkov A.M. Russian geophysical studies of Lake Vos-

- tok, Central East Antarctica // Eds. Fütterer D.K., Damaske D., Kleinschmidt G., Miller H., Tessensohn F. Antarctica—Contributions to Global Earth Sciences, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006. P. 135–140.
16. 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 // Eds. Fütterer D.K., Damaske D., Kleinschmidt G., Miller H., Tessensohn F. // Antarctica—Contributions to Global Earth Sciences, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006. P. 141–146.
 17. 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 // J. Glaciol., 2003. Vol. 49. No. 165. P. 179–183.
 18. Ridley J.K., Cudlip W., Laxon S.W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // J. Glaciol., 1993. 73 (133). P. 625–634.

Рецензенты: Ю.Г. Леонов, Ю.А. Волож

Deep Structure of the Vostok Basin, East Antarctica as Deduced from Seismological Observations

E. V. Isanina^a, N. A. Krupnova^a, S. V. Popov^b, V. N. Masolov^b, and V. V. Lukin^c

^a Russian Geocological Center, Branch Urangoo, Kondrat'evskii pr. 40, k. 13, St. Petersburg, 195197, Russia

^b Polar Marine Geological Exploration Expedition, ul. Pobedy 24, Lomonosov, St. Petersburg, 195197, Russia

e-mail: spopov67@yandex.ru

^c Russian Antarctic Expedition, Saint-Petersburg, Russia

Received August 19, 2008.

Abstract—Seismological observations using the earthquake converted-wave method were carried out from December 7, 2002 to January 23, 2003 (season 48 of the Russian Antarctic Expedition) in the southern part of subglacial Lake Vostok for the purpose of studying the structure of the Earth's crust. Three observation points were placed. One of them was located at the Vostok Station and the other two were located at distances of 8.7 and 12.02 km to the east and to the west of the station, respectively. The performed investigation showed that the thickness of the Earth's crust in the studied area is 34–36 km. The crust is subdivided into three blocks of different ranks. The low-velocity block is situated immediately beneath the Vostok Basin. Seven interfaces of mode conversion were detected. The results obtained allow us to suggest an increase in heat flow in the Vostok Basin and to the east of this basin. The seismic layering of the ice cover is correlated with the results of radiolocation profiling and the structure of the glacier documented in cores of Hole 5G-1. The interfaces within the glacier near the Vostok Station are located at depths of 700 ± 100 m, 1600 ± 100 m, and 2200 ± 100 m.