

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ

Валерий Викторович Ковалевский

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, тел. (383)330-71-96, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Алексей Геннадьевич Фатьянов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, тел. (383)330-60-46, e-mail: fat@nmsf.sscc.ru

Дмитрий Алексеевич Караваяев

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, тел. (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sscc.ru

Андрей Валерьевич Терехов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, тел. (383)330-60-46, e-mail: terekhov@ssd.sscc.ru

Людмила Петровна Брагинская

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sscc.ru

Андрей Павлович Григорюк

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sscc.ru

В статье приведены результаты математического моделирования полных волновых полей и теоретические сейсмограммы для двух скоростных моделей земной коры, полученных для юга Байкальской рифтовой зоны в экспериментах BEST (Baikal Explosion Seismic Transect), PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere) и MOBAL (Mongolian-Baikal Lithosphere seismological transect). Приведены экспериментальные данные вибросейсмических исследований на 500-км профиле Байкал-Улан-Батор. Выполнен анализ и сравнение теоретических сейсмограмм и экспериментальных данных времен первых вступлений в группе P-волн.

Ключевые слова: скоростные модели земной коры, эксперименты BEST, PASSCAL и MOBAL, математическое моделирование полных волновых полей, вибросейсмические исследования.

MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF VIBRO SEISMIC WAVE FIELDS IN BAIKAL REGION

Valeriy V. Kovalevskiy

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Professor, phone: (383)330-70-69, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Aleksey G. Fatyanov

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Professor, phone: (383)330-60-46, e-mail: fat@nmsf.sccc.ru

Dmitriy A. Karavaev

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., phone: (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sccc.ru

Andrey V. Terekhov

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., phone: (383)330-60-46, e-mail: terekhov@ssd.sccc.ru

Ludmila P. Braginskaya

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Programmer, phone: (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

Andrey P. Grigoruk

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sccc.ru

The paper presents the results of mathematical modeling of the full wave fields and theoretical seismograms for two velocity models of the Earth's crust obtained for the south of the Baikal rift zone in the experiments BEST (Baikal Explosion Seismic Transect), PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere) and MOBAL (Mongolian-Baikal Lithosphere seismological transect). Experimental data of vibroseismic studies on the Baikal-Ulaanbaatar 500-km profile are presented. Analysis and comparison of theoretical seismograms and experimental data of the first arrivals times in the group of P-waves is performed.

Key words: Earth's crust velocity models, BEST, PASSCAL, MOBAL experiments, mathematical modeling of full wave fields, vibroseismic research.

Введение

Исследования строения земной коры Байкальской рифтовой зоны является одной из фундаментальных задач геофизики, непосредственно связанной с изучением процессов рифтогенеза и современной геотектоники в одном из наиболее сейсмоактивных регионов Азии [1-8]. В настоящее время построено не-

сколько скоростных моделей земной коры юго-западной части Байкальской рифтовой зоны на основе данных глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и анализа вступлений Р-волн землетрясений методом приемной функции [9-11]. В регионе проводятся вибросейсмические исследования по методике активной сейсмологии и выполнен большой объем работ по регистрации вибросейсмических полей мощного сейсмического вибратора ЦВО-100 Южно-Байкальского геодинамического полигона СО РАН [12, 13].

Постановка задачи

Современные скоростные модели земной коры юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных областей северной Монголии получены в экспериментах BEST (Baikal Explosion Seismic Transect), а также PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere) и MOBAL (Mongolian-Baikal Lithosphere seismological transect) (рис. 1). Они имеют существенные различия и получены различными методами. В эксперименте BEST использовался метод ГСЗ с отраженными и преломленными волнами [9], в экспериментах PASSCAL и MOBAL - метод приемной функции с выделением в коде Р-волны обменных поперечных волн [10].

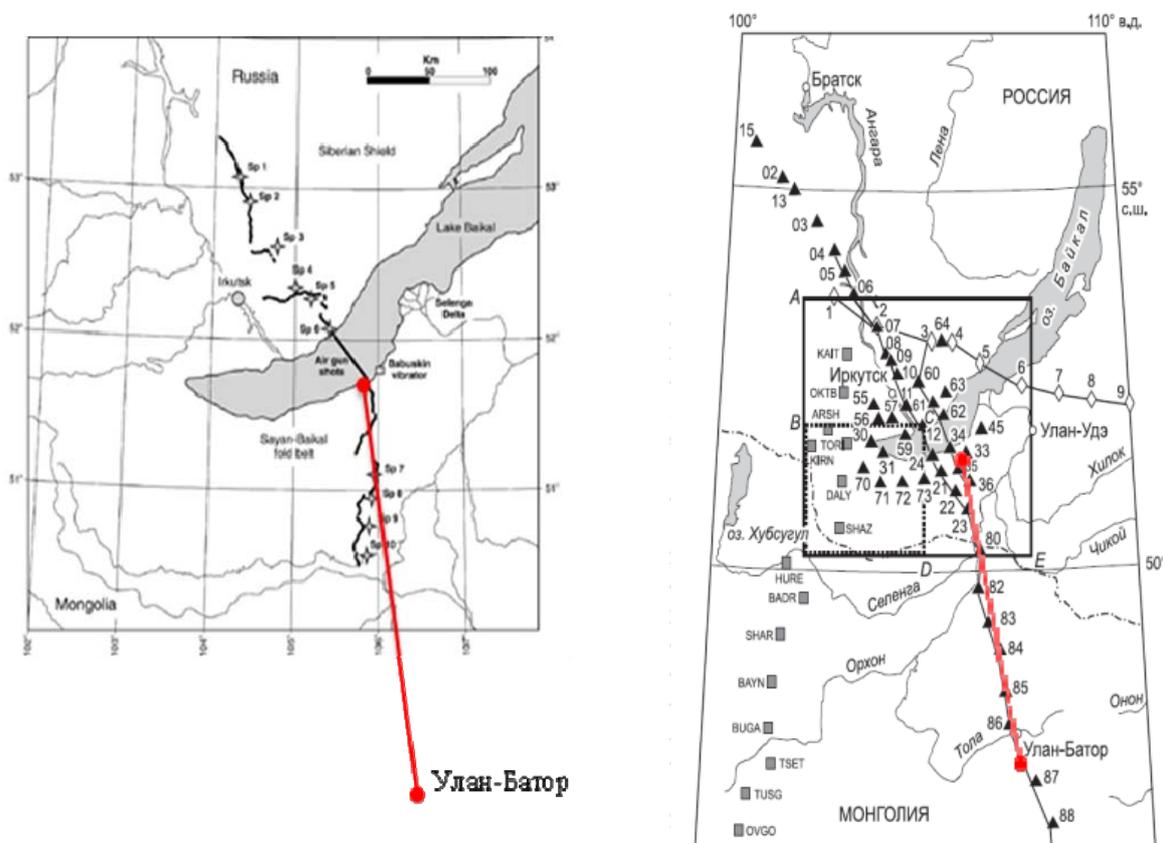


Рис. 1. Карта профилей экспериментов.

Эксперимент BEST – слева, эксперименты PASSCAL и MOBAL – справа, [9, 10].
Сплошная линия – 500 км профиль вибро-ГСЗ, Байкал – Улан-Батор

Целью международного эксперимента BEST являлось определение скоростного строения земной коры и верхней мантии под Сибирской платформой, Байкалом и Саяно-Байкальским складчатым поясом. Сейсмические данные были получены по методике ГСЗ с отраженными и преломленными волнами на 360-км профиле пересекающем Байкал и тектонические структуры южного Байкала (рис. 1). Использовались 175 цифровых регистраторов установленных вдоль профиля с шагом 2 км. В качестве сейсмических источников использовались взрывы в скважинах на суше, воздушные пушки на акватории Байкала и частично свип-сигналы сейсмического вибратора ЦВ-100 Южнобайкальского полигона.

Результатом работ было построение 2D скоростной модели сейсмических волн в земной коре вдоль профиля протяженностью 360 км пересекающего Байкал. Скоростная модель включает 5 слоев с неплоскими границами (рис. 2). В нижней коре на границе с мантией под Байкалом выделяется зона повышенных скоростей от 7.4-7.6 км/с до 7.9 км/с на глубинах от 30 км до 40 км. Второй особенностью модели является наличие в нижней коре на границе с мантией высокоскоростного слоя со скоростью 7.2-7.3 км/с. Он располагается на глубинах от 28 км до 42 км под Сибирской платформой и от 32 км до 46 км под Саяно-Байкальским складчатым поясом в южном Прибайкалье, при этом мощность слоя составляет более 10 км.

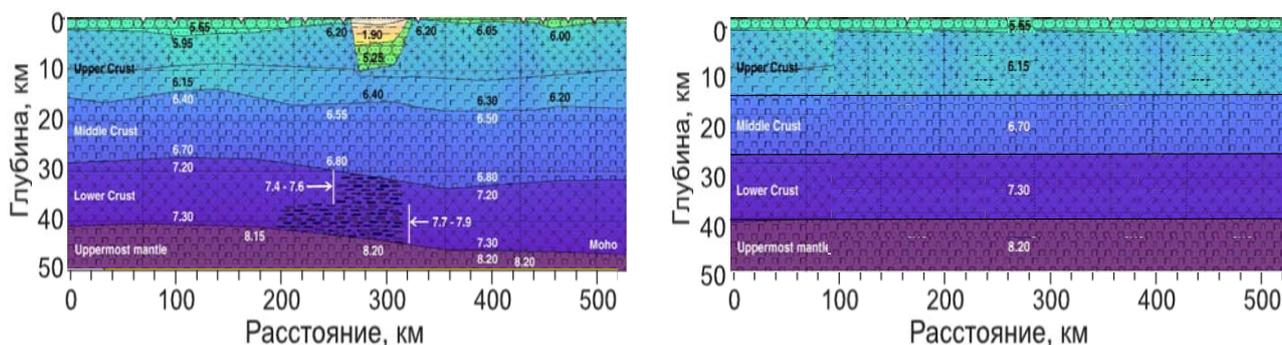


Рис. 2. Скоростные модели земной коры Байкальского региона. Слева скоростная модель по результатам эксперимента BEST [9]. Справа математическая модель для расчета полного волнового поля

Математическое моделирование

При математическом моделировании полных волновых полей для скоростной модели земной коры эксперимента BEST применялся модифицированный численно-аналитический метод для плоскостратных 3D моделей сред. Метод позволяет проводить расчеты на сверхдальние расстояния на профилях большой протяженности. В методе используются аналитические преобразования по пространственной и временной переменной и численно вычисляются значения рядов аналитических функций [14, 15].

Для эксперимента BEST математическое моделирование волнового поля осуществлено для модели с пятью плоскими слоями в земной коре на упругом полупространстве, моделирующем верхнюю мантию (рис. 2). Рассматривались варианты модели с разными значениями скоростей продольных волн в слое мощностью 10 км в нижней коре на границе с мантией. В первом случае скорость продольных волн была выбрана $V_p=7,25$ км/сек, как в модели [9], во втором случае скорость продольных волн в этом слое принята $V_p=6,65$ км/сек, что характерно для континентальной коры Азиатской плиты. Получены теоретические (синтетические) сейсмограммы, выполнен сравнительный анализ сейсмограмм для двух моделей и экспериментальных данных.

Для численного расчета полного волнового поля для слоистой модели эксперимента BEST с криволинейными границами между слоями был усовершенствован спектрально-разностный параллельный алгоритм, первоначально рассмотренный в [15]. В этом алгоритме исходная начально-краевая задача заменяется посредством интегрального преобразования Лагерра серией краевых задач для эллиптических уравнений.

Для решения разностных уравнений используются экономичные параллельные процедуры на основе быстрого преобразования Фурье и алгоритма дихотомии, разработанного для решения систем линейных алгебраических уравнений с трехдиагональными и блочно-трехдиагональными матрицами. Сокращение вычислительных затрат было достигнуто за счет реализации Dispersion Relation Preserving (DPR)-разностных схем. Дополнительно был реализован классический псевдо-спектральный алгоритм, где вычисление пространственной производной выполняется для каждой Фурье гармонике по отдельности. Пример расчета полного волнового поля для скоростной модели среды эксперимента BEST с рельефом на свободной границе приведен на рис. 3.

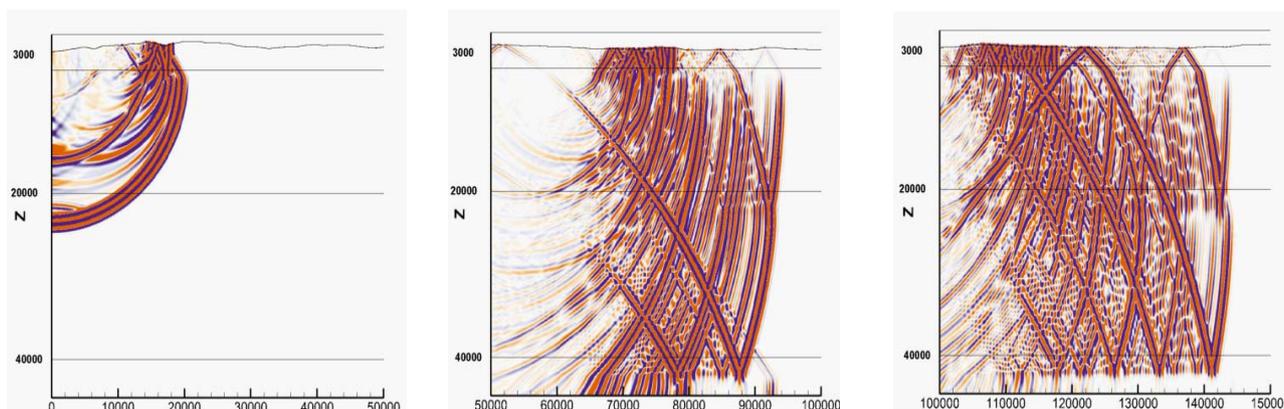


Рис. 3. Полное волновое поле для скоростной модели эксперимента BEST с рельефом на свободной границе в последовательные моменты времени. По горизонтальной оси расстояние от источника в метрах

Международные эксперименты PASSCAL и MOBAL проводились на юге Сибирской платформы, в южной части Байкальской рифтовой зоны и на террито-

рии Монголии [10]. Использовались 46 цифровых станций, установленных на расстоянии от 20-50 км друг от друга, с максимальной длиной профиля 1000 км. Было зарегистрировано и обработано более 100 сейсмограмм телесеismicких событий (землетрясений) с магнитудой более 5.5, с эпицентрными расстояниями 30–80° (3500-9000 км). Анализ сейсмограмм производился методом приемной функции с выделением в коде Р-волны обменных поперечных волн [16]. По результатам экспериментов построена 2D-модель скоростей seismicких волн в земной коре вдоль профилей регистрации. Скоростная модель имеет слабо выраженную слоистую структуру. Границы слоев характеризуются сильной изменчивостью, имеются также пятнистые включения зон повышенных и пониженных скоростей seismicких волн (рис. 4).

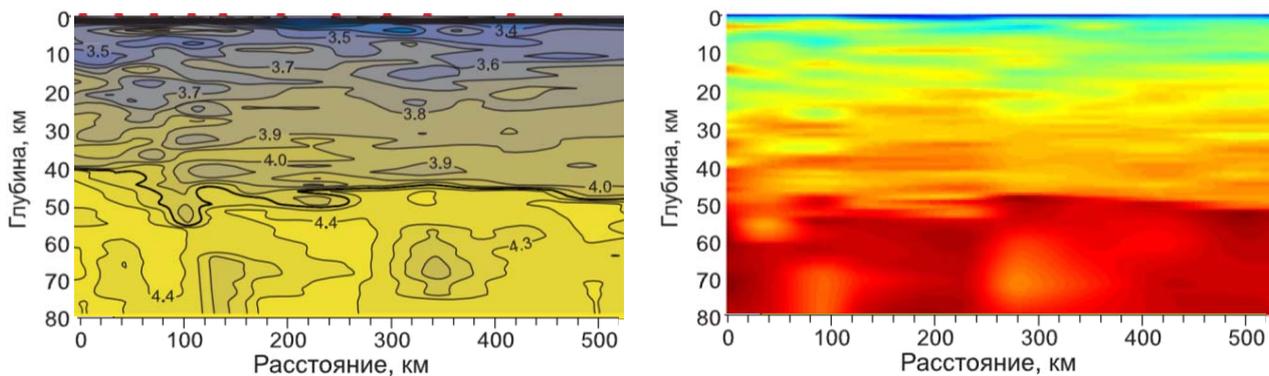


Рис. 4. Скоростная модель по результатам экспериментов PASSCAL и MOBAL [10] – слева. Математическая модель для расчета полного волнового поля – справа

Для математического моделирования полного вибросейсмического поля для существенно неоднородной 2D-модели скоростей seismicких волн в земной коре (эксперименты PASSCAL и MOBAL), а также слоистой модели с учетом криволинейности границ слоев (эксперимент BEST) использовались параллельные алгоритмы на основе конечно-разностных методов [17]. Разработана модифицированная конечно-разностная схема четвертого порядка точности по пространству [18]. Проведена адаптация и программная реализация способа для исключения отражений упругих волн от границ расчетной области. Для этого используется метод поглощающих границ для выбранной разностной схемы [19]. Разработана программа, реализующая расчет распространения упругих волн для основной схемы и для поглощающих границ, на графических картах типа Nvidia GPU поддерживающих технологию CUDA. В программе реализована возможность использования различных точечных источников seismicких волн: центр давления, вертикальная сила.

В результате математического моделирования волновых полей для скоростных моделей земной коры по данным экспериментов BEST, PASSCAL и MOBAL получены синтетические сейсмограммы для расстояний 0-500 км от источника (рис. 5).

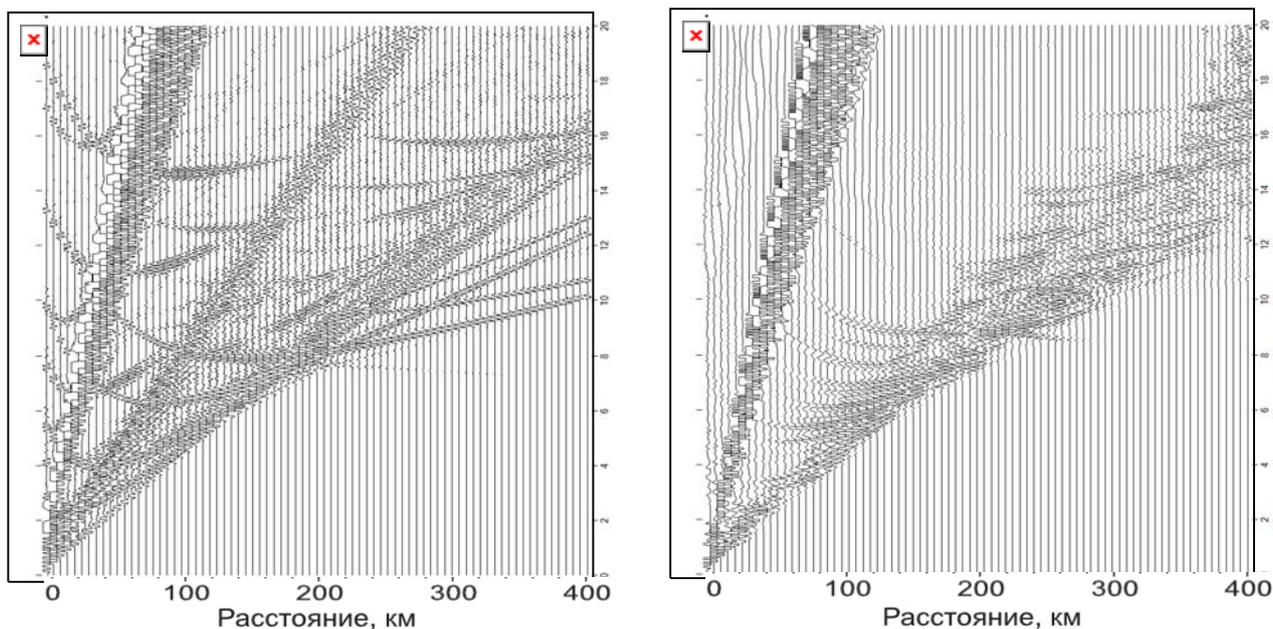


Рис. 5. Редуцированные синтетические сейсмограммы:

Слева для скоростной модели эксперимента BEST, справа для экспериментов PASSCAL и MOBAL – справа. Точки – времена вступлений первых 4 волн на экспериментальных сейсмограммах. По вертикальной оси время в сек. Скорость редукции 8 км/с

На сейсмограммах для слоистой скоростной модели эксперимента BEST отчетливо выделяются прямые, отраженные, преломленные волны с отчетливыми временами вступлений и скоростями, соответствующими слоям модели. Сейсмограммы для неоднородной скоростной модели экспериментов PASSCAL и MOBAL имеют вид протяженных цугов колебаний, представляющих суперпозицию волн. Отраженные волны прослеживаются только на первых 150 км. Волны в первых вступлениях имеют существенно разную амплитуду на различных участках профиля.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные работы по активной сейсмологии проводятся в южном Прибайкалье с использованием в качестве источника сейсмических волн мощного 100-тонного сейсмического вибратора, расположенного на Южнобайкальском геодинамическом полигоне СО РАН [20]. Целью работ является глубинное вибросейсмическое зондирование (вибро-ГСЗ) Монголо-Сибирского региона в зоне сочленения Байкальского рифта и Центрально-Азиатского подвижного пояса. В 2011–2013 гг. вибро-ГСЗ выполнено на 500-км профиле Бабушкин–Сухэ-Батор–Дархан–Улан-Батор от 65 км до 500 км в южном направлении от источника на российской и монгольской территории (рис. 1).

Для регистрации использовались малые сейсмические группы из 5-10 трехкомпонентных датчиков с цифровыми регистраторами «Байкал» с общей базой

группы 1-2 км. Расстояния между точками регистрации на профиле составляло от 20 км до 50 км. Для всех точек регистрации на профиле получены вибрационные сейсмограммы, примеры которых представлены на рис. 6.

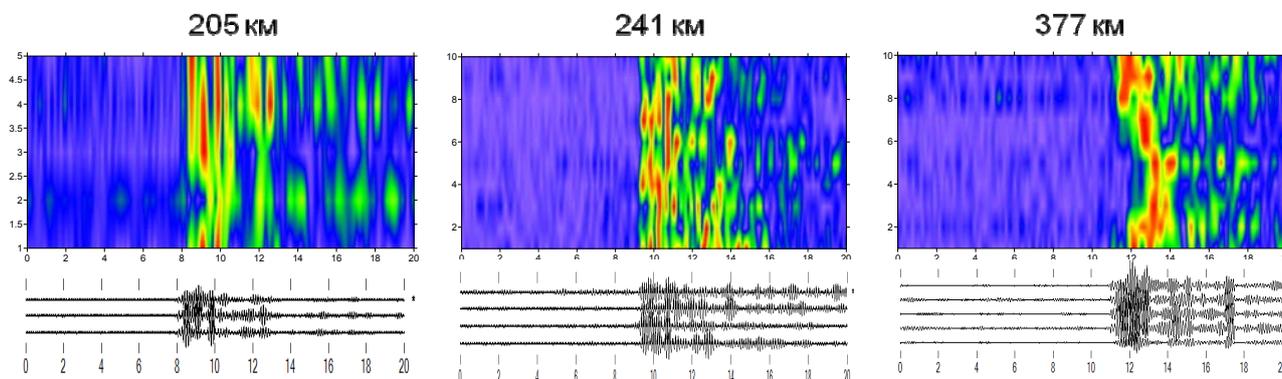


Рис. 6. Экспериментальные вибрационные сейсмограммы.

Графическое представление амплитуд Р-волн – сверху, вибрационные сейсмограммы – внизу. Расстояние от источника 205 км, 241 км, 377 км

Для обработки вибросейсмических сигналов используется специализированное программное обеспечение на базе программы обработки вибросигналов V12, созданной в ИВМиМГ СО РАН. Алгоритмы обработки включают пространственную фильтрацию данных сейсмической группы, которая оказалась очень эффективной для выделения основных групп волн (сейсмических фаз) и подавления волн-помех.

При построении и анализе сейсмограмм применяется преобразование Гильберта и графические средства отображения текущих амплитуд сейсмограмм. Это позволяет построить для сейсмограмм волновые карты участков Р-волн (рис. 6). По вибрационным сейсмограммам и их волновым картам определены времена вступлений в группе Р-волн. Времена вступлений первых 4 волн в качестве экспериментальных данных отмечены на редуцированных синтетических сейсмограммах для скоростных моделей экспериментов BEST, PASSCAL и MOBAL (рис. 5). Они соответствуют временам вступлений группы Р-волн наибольшей интенсивности для этих экспериментов. Вместе с тем, для эксперимента BEST экспериментальные данные не содержат времен вступлений соответствующих волнам со скоростью продольных волн $V_p=7.25$ км/с связанных со слоем мощностью около 10 км в нижней коре.

Заключение

Математическое моделирование полных волновых полей для двух скоростных моделей земной коры, полученных для юга Байкальской рифтовой зоны в экспериментах BEST, PASSCAL и MOBAL позволило получить теоретические сейсмограммы в области 0-500 км от источника. Анализ эксперименталь-

ных данных времен первых вступлений в группе Р-волн на 500-км профиле Байкал–Улан-Батор показал, что они соответствуют временам вступлений группы Р-волн наибольшей интенсивности для этих экспериментов. Экспериментальные данные не содержат времен вступлений соответствующих волнам со скоростью продольных волн $V_p=7.25$ км/с связанных со слоем мощностью около 10 км в нижней коре, которая присутствует в скоростной модели земной коры по данным эксперимента BEST.

Работа выполнена в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН тема № 0315-2016-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bushenkova N., Tychkov S., Koulakov I. Tomography on PP-P waves and its application for investigation of the upper mantle in central Siberia // *Tectonophysics*, – 2002. – v. 358, № 1–4, p. 57–76.
2. Emmerson B., Jackson J., McKenzie D., Priestley K. Seismicity, structure and rheology of the lithosphere in the Lake Baikal region // *Geophys. J. Inter.*, – 2006. – v. 167, p. 1233–1272
3. Gao S. S., Liu K. H., Davis P. M., Slack P. D., Zorin Y. A., Mordvinova V. V., Kozhevnikov V. M. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone // *J. Geophys. Res.*, – 2003. – v. 108, № B4, 2194, p. ESE 5–12
4. Liu K. H., Gao S. S. Mantle transition zone discontinuities beneath the Baikal rift and adjacent areas // *J. Geophys. Res.*, – 2006. – v. 111, № B11301.
5. Tiberi C., Diament M., De´verche`re J., Petit-Mariani C., Mikhailov V., Tikhotsky S., Achauer U. Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology // *J. Geophys. Res.*, – 2003. – v. 108, № B3, 2133,
6. Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., Gao S. Deep structure and origin of the Baikal rift zone // *Earth Planet. Sci. Lett.*, – 2006. – v. 243, p. 681–691.
7. Zorin Yu. A., Mordvinova V. V., Turutanov E. Kh., Belichenko V. G., Artemyev A. A., Kosarev G. L., Gao S. S. Low seismic velocity layers in the Earth’s crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication // *Tectonophysics*, – 2002. – v. 359, p. 307–327.
8. Zorin Yu. A., Turutanov E. Kh., Mordvinova V. V., Kozhevnikov V. M., Belichenko V. G., Mazuka bzov A. M., Tumurtogoo O., Khosbayar P., Arvisbaatar N., Gao S. Structure of the crust and paleogeodynamic of Central and Eastern Mongolia and adjacent regions of Eastern Siberia (result of investigations on SiberianMongolian transects) // *Complex geophysical and seismological investigations in Mongolia. Ulaanbaator, Irkutsk*, – 2004. – p. 33–50.
9. Nielsen C., Thybo H. Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // *Tectonophysics*. – 2009. – v. 470. – C. 298-318.
10. Mordvinova V. V. and Artemyev A. A. The three-dimensional shear velocity structure of lithosphere in the southern Baikal rift system and its surroundings // *Russian Geology and Geophysics*, – 2010. – Vol. 51, Issue 6, June 2010, p. 694-707
11. Suvorov V. D., Mishenkina Z. M., Petrick G. V., Sheludko I. F., Seleznev V. S., Solovyov V. M. Structure of the crust in the Baikal rift zone and adjacent areas from Deep Seismic Sounding data // *Tectonophysics*, – 2002. – v. 351, p. 61–74.
12. Alekseev A. S., Tsibulchik G. M., Kovalevsky V. V., Belonosov A. S. The basis of the theory of active geophysical (multidisciplinary) monitoring. Conception of “source” and “surface” dilatant zones // *Active geophysical monitoring, Handbook of Geophysical Exploration, Vol. 40*, Elsevier, – 2010. – p. 105-133.

13. Alekseev A. S., Glinsky B. M., Kovalevsky V. V., Khairtdinov M. S. Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results // *Active geophysical monitoring, Handbook of Geophysical Exploration*, Vol. 40, Elsevier, – 2010. – p. 55-71
14. Fatyanov A. G., Terekhov A. V. High-performance modeling acoustic and elastic waves using the Parallel Dichotomy Algorithm // *Journal of Computational Physics*, – 2011. – Vol. 230. p. 1992–2003.
15. Terekhov A. V., Spectral-difference parallel algorithm for the seismic forward modeling in the presence of complex topography // *Journal of Applied Geophysics*, – 2015.– Vol. 115, p. 206-219.
16. Vinnik L. P. Detection of waves converted from P to S in the mantle // *Phys. Earth Planet. Inter.*, – 197.7– v. 15, p. 39—45.
17. Караваев Д. А. Параллельная реализация метода численного моделирования волновых полей в трехмерных моделях неоднородных сред // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2009. – № 6 (1). С. 203 – 209
18. Levander A. R. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms // *Geophysics* – 1988. – vol. 53, p. 1425–1436
19. Komatitsch D. and Martin R. An unsplit convolutional Perfectly Matched Layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation // *Geophysics*, – 2007. – vol. 72(5), p. SM155-SM167.
20. Kovalevskiy V. Chimed O., Tubanov Ts., Braginskaya L., Grigoruk A., Fatyanov A. Vibroseismic sounding of the Earth's crust on the profile Baikal – Ulaanbaatar // *Proceedings of the International Conference on Astronomy & Geophysics in Mongolia*, – 2017.– p. 261-265.

REFERENCES

1. Bushenkova N., Tychkov S., Koulakov I. (2002). Tomography on PP-P waves and its application for investigation of the upper mantle in central Siberia. *Tectonophysics*, v. 358, № 1—4, p. 57—76.
2. Emmerson B., Jackson J., McKenzie D., Priestley K. (2006). Seismicity, structure and rheology of the lithosphere in the Lake Baikal region. *Geophys. J. Inter.*, v. 167, p. 1233—1272
3. Gao S. S., Liu K. H., Davis P. M., Slack P. D., Zorin Y. A., Mordvinova V. V., Kozhevnikov V. M. (2003). Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone. *J. Geophys. Res.*, v. 108, № B4, 2194, P. ESE 5—12
4. Liu K. H., Gao S. S. (2006). Mantle transition zone discontinuities beneath the Baikal rift and adjacent areas. *J. Geophys. Res.*, v. 111, № B11301.
5. Tiberi C., Diament M., De´verche`re J., et al. (2003). Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology. *J. Geophys. Res.*, v. 108, № B3, 2133,
6. Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., Gao S. (2006). Deep structure and origin of the Baikal rift zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 243, p. 681—691.
7. Zorin Yu. A., Mordvinova V. V., Turutanov E. Kh., et al. (2002). Low seismic velocity layers in the Earth's crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication. *Tectonophysics*, v. 359, p. 307—327.
8. Zorin Yu. A., Turutanov E. Kh., Mordvinova V. V., et al. (2004). Structure of the crust and paleogeodynamic of Central and Eastern Mongolia and adjacent regions of Eastern Siberia (result of investigations on SiberianMongolian transects). *Complex geophysical and seismological investigations in Mongolia. Ulaanbaator, Irkutsk*, p. 33—50.
9. Nielsen C., Thybo H. (2009). Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data. *Tectonophysics*. - 2009. 470. – С. 298-318.
10. Mordvinova V. V. and Artemyev A. A. (2010). The three-dimensional shear velocity structure of lithosphere in the southern Baikal rift system and its surroundings. *Russian Geology and Geophysics*, Vol. 51, Issue 6, June 2010, Pp. 694-707

11. Suvorov V. D., Mishenkina Z. M., Petrick G. V., et al. (2002). Structure of the crust in the Baikal rift zone and adjacent areas from Deep Seismic Sounding data. *Tectonophysics*, v. 351, p. 61—74.
12. Alekseev A. S., Tsibulchik G. M., Kovalevsky V. V., Belonosov A. S. (2010). The basis of the theory of active geophysical (multidisciplinary) monitoring. Conception of "source" and "surface" dilatant zones. *Active geophysical monitoring, Handbook of Geophysical Exploration*, Vol. 40, Elsevier, pp. 105-133.
13. Alekseev A. S., Glinsky B. M., Kovalevsky V. V., Khairtdinov M. S. (2010) Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results. *Active geophysical monitoring, Handbook of Geophysical Exploration*, Vol. 40, Elsevier, pp. 55-71
14. Fatyanov A. G., Terekhov A. V. (2011) High-performance modeling acoustic and elastic waves using the Parallel Dichotomy Algorithm. *J. Comp. Phys.* Vol. 230. P. 1992–2003.
15. Terekhov A. V. (2015) Spectral-difference parallel algorithm for the seismic forward modeling in the presence of complex topography. *J. of Appl. Geoph.*, Vol. 115, pp. 206-219.
16. Vinnik L. P. (1977). Detection of waves converted from P to S in the mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 15, p. 39—45.
17. Karavaev D. A. (2009). Parallel implementation of the method of numerical simulation of wave fields in three-dimensional models of inhomogeneous media. *Bulletin of the Nizhny Novgorod State University named N.I. Lobachevsky*. № 6 (1). P. 203 – 209 [in Russian].
18. Levander, A. R. (1988). Fourth-order finite-difference P-SV seismograms, *Geophysics*, vol. 53, 1425–1436
19. Komatitsch D. and Martin R. (2007). An unsplit convolutional Perfectly Matched Layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation, *Geophysics*, vol. 72(5), p SM155-SM167.
20. Kovalevskiy V., Chimed O., Tubanov Ts., Braginskaya L., Grigoruk A., Fatyanov A. (2017). Vibroseismic sounding of the Earth's crust on the profile Baikal – Ulaanbaatar. *Proceedings of the International Conference on Astronomy & Geophysics in Mongolia 2017*, p. 261-265.

*© В. В. Ковалевский, А. Г. Фатьянов, Д. А. Караваев,
А. В. Терехов, Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, 2018*