НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЗАТУХАНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

¹Добрынина А.А., ^{1,2}Саньков В.А., ³Чечельницкий В.В.

¹*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: dobrynina@crust.irk.ru*

²*Иркутский государственный университет, геологический факультет, г. Иркутск, ул. Ленина, 25*

³*Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128*

Представлены результаты исследований затухания сейсмических волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы методами огибающей сейсмической коды и скользящего окна. В подкоровой части литосферы выделяется слой с повышенным затуханием сейсмических волн небольшой мощности, связанный, по-видимому, с повышенной неоднородностью (раздробленности) и присутствием флюидов. Глубина залегания подошвы литосферы изменяется от 100-120 км на западе территории в пределах Байкальской складчатой области до 120-140 км – на востоке в пределах Сибирской платформы. Сделано заключение о наличии двух астеносферы астеносферных слоев. Выявленные особенности строения литосферы и верхней мантии предполагают возможность постепенной их модификации при участии процессов флюидизации и частичного плавления в условиях позднекайнозойского растяжения под воздействием удаленных источников тектогенеза.

Ключевые слова: затухание сейсмических волн, добротность, Байкальская рифтовая система, литосфера, астеносфера.

NEW DATA ABOUT SEISMIC WAVE ATTENUATION IN THE LITHOSPHERE AND UPPER MANTLE OF NORTHEASTERN FLANC OF BAIKAL RIFT SYSTEM

¹Anna A. Dobrynina, ^{1,2}Vladimir A. Sankov, ³Vladimir V. Chechelnitskii

¹Institute of the Earth's crust, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Lermontov st., 128, e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

²Irkutsk State University, geological faculty, Irkutsk, Lenina, 25, e-mail: sankov@crust.irk.ru

³Baikal regional seismological center, Geophysical survey, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Lermontov st., 128, e-mail: chechel@crust.irk.ru

The results of studies of seismic wave attenuation in the lithosphere and upper mantle of the northeastern flank of the Baikal rift system obtained using a techniques of envelope seismic coda and the sliding window are presented. In subcrustal lithosphere there is a layer with high attenuation of seismic waves connected, apparently, with high heterogeneity (fragmentation) and the presence of fluids. The depth of the base of the lithosphere varies from 100-120 km to the west of the territory within the Baikal folded area to 120-140 km - to the east within the Siberian platform. It is concluded that there are two layers of the asthenosphere. The revealed features of the structure of the lithosphere and upper mantle suggest the possibility of a gradual modification process with the participation of fluidization and partial melting in a late Cenozoic extension under the influence of distant sources orogeny.

Keywords: attenuation of seismic waves, the quality factor, the Baikal rift system, the lithosphere, the asthenosphere.

К настоящему времени получено достаточное количество данных о том, что под Байкальской рифтовой системой (БРС) не существует единой крупной мантийной аномалии. Это не позволяет считать, что гипотеза активного рифтинга может исчерпывающе объяснить формирование рифтовых структур. В связи с этим возможно предположить, что растяжение, возникающее под воздействием не локальных удаленных источников тектонических сил, инициирует постепенные изменения свойств литосферы по всему разрезу, выражающиеся в появлении локальных аномалий, выраженных, в частности, в глубинных вариациях затухания и скоростей сейсмических волн.

В данной работе нами исследуются глубинные вариации затухания сейсмических кода-волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга БРС. Ранее авторами по кода-волнам региональных землетрясений была рассчитана сейсмическая добротность литосферы для всей территории северо-восточного фланга БРС и проведены сопоставления полученных результатов с возрастом консолидации коры, степенью сейсмической активности и нарушенности среды разломами [1]. В работах немногочисленных предшественников исследования добротности (Q) земной коры и верхней мантии БРС и, в частности, ее северо-восточного фланга, по большей части носили локальный характер. Можно упомянуть лишь несколько публикаций на эту тему [2-4]. В работе Ю.Ф. Копничева [5] исследованы закономерности затухания в литосфере юго-западного фланга БРС, а также приведены оценки поглощения по данным удаленных станций для всего региона. В целом, закономерности глубинных вариаций сейсмической добротности для большей части региона до сих пор исследованы недостаточно.

Глубинные разрезы сейсмической добротности QC были получены по кода-волнам умеренной силы и сильных локальных землетрясений (20 событий с магнитудой $M \geq 4$, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях до 200 км). Для обработки данных использовались два метода: 1) метод огибающей сейсмической коды [2, 5] и 2) метод скользящего окна (длина окна выбиралась равной 10-15 секундам, шаг 5 секунд). Глубина проникновения кода-волн

рассчитывалась согласно стандартному подходу, исходя из простых геометрических соображений. Для анализа глубинных вариаций затухания использовались значения добротности на частоте 1 Гц, так как на этих частотах наилучшим образом проявляется неоднородность поля затухания [5].

В результате были получены одномерные глубинные разрезы сейсмической добротности Q_c для одиннадцати локальных областей рассматриваемого региона (Рис. 1, 2). Диапазон глубин составляет порядка 260 км (от 44 до 306 км) и включает в себя литосферную мантию и астеносферу (Рис. 1, 2). Глубинные разрезы Q_c показывают достаточно сильные вариации добротности (от 50 до 170), при этом отмечается неравномерное изменение величины Q_c с глубиной – наблюдается чередование слоев с повышенным и пониженным затуханием (Рис. 1). Ранее авторами отмечена приуроченность изменения характеристик затухания к скоростным границам в литосфере [4, 5].

Рис. 1. Локальные глубинные разрезы сейсмической добротности Q_c

Среднеквадратичное отклонение на профилях показано тонкими серыми линиями; серым вертикальным столбиком показано среднее для каждого района значение добротности литосферы до глубины 87 км по [4]. Справа внизу приведен для сравнения с глубинным разрезом добротности приведен разрез скоростей S-волн под станцией NIZ (Нижнеангарск) [14] (справа, серым показана референц-модель, пунктирными линиями выделены области высокого затухания и низких скоростей S-волн).

Практически на всех профилях на глубине примерно 100 км выделяется тонкий слой (от 20 км) с повышенным затуханием (Рис. 1, 2), причем под разными станциями глубина залегания слоя и его толщина несколько меняются. Так, для станции Улюнхан (YLYR, пр. 1, 2), расположенной на северном замыкании Баргузинской впадины, этот слой расположен на глубинах от 70 до 90 км (пр.1) и от 90 до 100 км (пр.2). Под Кичерской впадиной (станция Нижнеангарск NIZ, пр.3) слой залегает на глубинах 110-140 км, а под Кичерско-Верхнеангарской междувпадинной перемычкой (станция Кумора КМО, пр. 5) он несколько утоняется и отмечен в интервале глубин 100-120 км. Под Верхнеангарской впадиной (станция Уоян УОА, пр.6) слой повышенного затухания начинается с глубины 115 км, в то время, как под Верхнеангарско-Муйской перемычкой (станция Северомуйск SVKR, пр. 7, 8) он поднимается до глубин 100-110 км. Чарская впадина и ее горное обрамление (станция Чара CRS, пр. 9, 10, 11) характеризуются самым заглубленным положением кровли слоя повышенного затухания – 120-140 км.

Рис. 2. Схематический разрез литосферы и верхней мантии северо-восточного фланга БРС, основанный на интерполяции данных о поглощении сейсмических кода-волн

Условные обозначения: 1 – кривые сейсмической добротности; 2 – области повышенного затухания сейсмических волн; 3 – предположительные границы области повышенного затухания; 4 – граница между литосферой и астеносферой (LAB); 5 – граница Мохововича (M); 6 – граница Лемана (L); 7 – сейсмические станции и их названия.

В нижней части разреза под несколькими станциями также выделяется достаточно мощный слой повышенного затухания сейсмических волн. В западной части территории он залегает на глубинах 160-200 км, а в восточной – на глубинах 180-240 км. Отметим, что повышенное затухание сейсмических волн характерно и для верхней части разреза (глубины менее 100 км). Так, по данным измерений на профилях 7 и 8 (станция Северомуйск SVKR), литосфера Верхнеангарско-Муйской междувпадинной перемычки характеризуется наличием слоя с самыми низкими значениями сейсмической добротности ($Q_C(\text{пр.7}) = 56$, $Q_C(\text{пр.8}) = 68$), непосредственно под корой, на глубинах менее 75 км. Ранее высокое затухание сейсмических волн в этом районе отмечалось по результатам оценки эффективной добротности литосферы [4] и связывалось с высокой степенью неоднородности среды. Профили 9 и 10 (станция Чара CRS), характеризующие литосферу южной части Чарской впадины и севера Удоканского поднятия, также указывают на наличие слоев с повышенным затуханием в пределах глубин 60-100 км.

Глубинное строение литосферы и верхней мантии исследуемого региона рассматривалось в работах [6-9]. Анализ скоростных аномалий продольных волн, полученных по результатам телесеismicкой 2D-томографии вдоль простирания БРС [8], показал, что под многими структурами рифтовой системы на глубине 90-110 км прослеживается граница между отрицательными и положительными аномалиями скоростей сейсмических волн. То же наблюдается по нашим данным о глубине положения слоя повышенного затухания (см. Рис. 2). При этом под Чарской впадиной и ее горным обрамлением кровля этого слоя погружается до глубины от 120 до 140 км, что согласуется с увеличением мощности литосферы при переходе от складчатой области к Сибирской платформе. По данным ГСЗ выявлено двухслойное строение области низкоскоростной мантии [6]. Подкоровый аномальный слой толщиной 20-50 км отделен от более глубоких горизонтов верхней мантии с близкими скоростными характеристиками (7.6-7.8 км/с) слоем с нормальными для этих глубин

скоростями продольных волн (8.0-8.1 км/с). Контраст добротности Q_C между этими слоями составляет от 15-20 до 30-50. По данным МТЗ [10] на территории исследуемого региона выявлен проводящий астеносферный слой на глубинах 80-120 км, которому соответствует слой пониженных скоростей сейсмических волн. Его формирование автором цитируемой работы объясняется частичным плавлением мантийных пород. В работе [5] приводятся сопоставимые с полученными нами данные о глубине подошвы литосферы по данным сейсмической томографии.

Сопоставление полученных разрезов Q_C с одномерными профилями скоростей S-волн [9] показывает, что изменения значений добротности приурочены к скоростным границам среды, причем для областей с повышенными скоростями сейсмических волн также характерны повышенные значения Q_C и наоборот (Рис. 1). Оба метода указывают на трехслойное строение астеносферы в регионе. Нижняя граница области пониженных скоростей и высокого затухания сейсмических волн в мантии (граница Лемана) находится на глубине 190-240 км. Слои с повышенным затуханием сейсмических волн в литосфере (глубины менее 100 км), фиксируемые в пределах Верхнеангарско-Муйской перемычки и в районе Чарской впадины могут иметь различное происхождение. В первом случае их формирование может быть связано с повышенной сейсмической активностью, раздробленностью и, вследствие этого, повышенной флюидонасыщенностью литосферы. Во втором случае нельзя исключить возможность появления на глубинах 70-90 км промежуточных магматических очагов – источников позднекайнозойских базальтов Удоканского вулканического поля и приуроченность к ним областей повышенного затухания сейсмических волн. Кроме того, наблюдаемое под Удоканом утонение литосферы также может фиксировать положение области плавления в верхней мантии.

Таким образом, нами получена многослойная модель сейсмической добротности литосферы и верхней мантии северо-восточного фланга БРС с

чередованием слоев с повышенным и пониженным затуханием сейсмических волн (Рис. 1). Слой с повышенным затуханием в нижней части разреза соответствует астеносфера, залегающая в регионе на глубинах от 90 до 150 км. Кроме того, на глубинах 180-240 км выделен еще один слой с повышенным затуханием, который может быть также интерпретирован, как часть астеносферы. Повышенное затухание волн в этих слоях связано, скорее всего, с наличием неоднородностей в виде горизонтальных границ и частичным плавлением вещества мантии. Наличие слоев с повышенным затуханием в верхней части разреза может быть связано с повышенной сейсмической активностью, тектонической раздробленностью и флюидонасыщенностью литосферы, а также с проявлением магматических очагов в литосфере в районе Удоканского вулканического поля.

Предложенная ранее Н.А. Логачевым модель формирования Байкальского рифта за счет поднятия к подошве литосферы и растекания единого тела аномальной мантии предполагает появление на всех разрезах мощного слоя с повышенным затуханием под основанием литосферы при ее утонении. По нашим данным, а также по данным [8, 9], под литосферой северо-восточного фланга БРС такого единого тела не выделяется. Литосферная и астеносферная мантия имеет слоистое строение, что препятствует проявлению конвекции. Полученная многослойная модель сейсмической добротности литосферы и верхней мантии северо-восточного фланга БРС вместе с аналогичными результатами для юго-западного фланга [9], могут являться свидетельствами пассивного механизма формирования рифтовой системы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-45-04157), программа ОНЗ РАН № 7.7 и гранта Президента РФ (проект № МК 1171.2014.5).

Список литературы

1. Dobrynina A.A. Physics of the Earth and Planets Interior, 2011. V. 188: P. 121-126, doi:10.1016/j.pepi.2011.05.008.
2. Раутиан Т. Г. и др. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 144 с.
3. Дергачев А. А. Геология и геофизика // 1982. №6. С. 94-101.
4. Кочетков В. М. и др. Детальные сейсмологические исследования в Северо-Муйском районе // Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность / Ред. С.Л. Соловьев. Новосибирск: Наука, 1985. С. 123–180.
5. Копничев Ю.Ф. // Докл. АН, 1992. Т. 325(5). С. 944-948.
6. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах / С.В. Крылов, Б.П. Мишенькин, Мишенькина З.Р. и др. -Новосибирск: Наука, 1993. - 199 с.
7. Поспеев А.В. Электропроводность земной коры и мантии западной части Байкало-Амурского региона // Астеносфера по комплексу геофизических методов. – Киев: Наукова думка, 1988. С. 34-44.
8. Мордвинова В.В. Строение земной коры и верхней мантии Центральной Азии по данным телесейсмических объемных волн. Автореф. дисс. на соискание степени док. геол.-мин. наук. Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2009. 35 с.
9. Ананьин Л.В., Мордвинова В.В., Гоць М.Ф. и др. // Докл. РАН, 2009. Т. 428 (2). С. 211-214.
10. Priestley K., Debayle E., McKenzie D. et al. // J. Geofh. Res., 2006. V. 3, B10304. doi:10.1029/2005JB004082.