

УДК 550.347.097(571.5)

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

© 2016 г. А. А. Добрынина¹, В. А. Саньков^{1,2}, В. В. Чечельницкий³

Представлено академиком РАН М.И. Эповым 02.04.2015 г.

Поступило 13.04.2015 г.

Представлены результаты исследований затухания сейсмических волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы методами огибающей сейсмической коды и скользящего окна. Для 11 локальных районов получены одномерные модели затухания, характеризующиеся чередованием слоев с высоким и низким затуханием, что согласуется с результатами, полученными ранее для юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы Ю.Ф. Копничевым [9]. В подкоревой части литосферы выделяется слой с повышенным затуханием сейсмических волн небольшой мощности, связанный, по-видимому, с повышенной неоднородностью (раздробленностью) 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 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.

DOI: 10.7868/S0869565216130168

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 [1] может исчерпывающе объяснить формирование рифтовых структур. В связи с этим можно предположить, что растяжение, возникающее под воздействием не локальных удаленных источников тектонических сил [2, 3], инициирует постепенные изменения свойств литосферы по всему разрезу. Они выражаются в появлении локальных аномалий, выраженных, в частности, в глубинных вариациях затухания и скоростей сейсмических волн.

В данной работе нами исследованы глубинные вариации затухания сейсмических кода-волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга БРС. Ранее авторами по кода-волнам ре-

гиональных землетрясений была рассчитана сейсмическая добротность литосферы для всей территории северо-восточного фланга БРС и полученные результаты сопоставлены с возрастом консолидации коры, степенью сейсмической активности и нарушенности среды разломами [4, 5]. В немногочисленных работах 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 [6–8]. В работе Ю.Ф. Копничева [9] 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 Q_c были получены по кода-волнам умеренных и сильных локальных землетрясений (20 событий с магнитудой $M \geq 4$, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях до 200 км, рис. 1). Для обработки данных использовались два метода: метод огибающей сейсмической коды [6, 9] и метод скользящего окна (длина окна выбиралась равной 10–15 с, шаг 5 с). Глубину проникновения кода-волн рассчитывали согласно стандартному

¹ Институт земной коры

Сибирского отделения

Российской Академии наук, Иркутск

E-mail: dobrynina@crust.irk.ru

² Иркутский государственный университет³ Байкальский филиал Геофизической службы

Сибирского отделения

Российской Академии наук, Иркутск

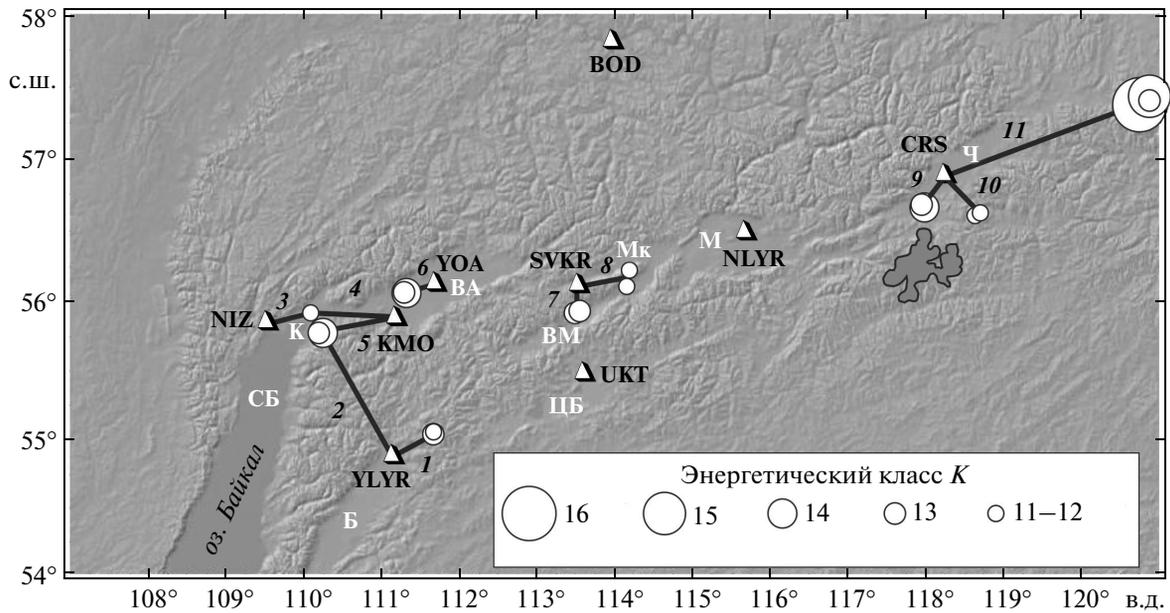


Рис. 1. Положение сейсмических профилей на территории исследуемого региона. Треугольниками обозначены сейсмические станции, положение разрезов показано черными линиями, цифрами – номера разрезов, буквами обозначены кайнозойские рифтовые впадины: К – Кичерская, ВА – Верхне-Ангарская, СБ – Северо-Байкальская, Б – Баргузинская, ЦБ – Ципа-Баунтовская, ВМ – Верхне-Муйская, Мк – Муяканская, М – Муйская, Ч – Чарская. Темно-серым цветом показано Удоканское поле базальтов.

подходу, исходя из простых геометрических соображений [10]. Для анализа глубинных вариаций затухания использовали значения добротности на частоте 1 Гц, так как на этих частотах наилучшим образом проявляется неоднородность поля затухания [9].

В результате были получены одномерные глубинные разрезы сейсмической добротности Q_c для 11 локальных областей рассматриваемого региона (рис. 2, 3). Диапазон глубин составляет порядка 260 км (от 44 до 306 км) и включает в себя литосферную мантию и астеносферу (рис. 2, 3). 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. 2, 3). Ранее авторами отмечена приуроченность изменения характеристик затухания к скоростным границам в литосфере [4, 5]. Практически на всех профилях на глубине примерно 100 км выделяется тонкий слой (от 20 км) с повышенным затуханием (рис. 2, 3), 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 находится 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-Верхне-

ангарской междувпадинной перемычкой (станция Кумора КМО, пр. 5) он несколько утончается и отмечен в интервале глубин 100–120 км. Под Верхнеангарской впадиной (станция Уоян YOA, 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. 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 (пр. 7) = 56, Q_c (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), характеризую-

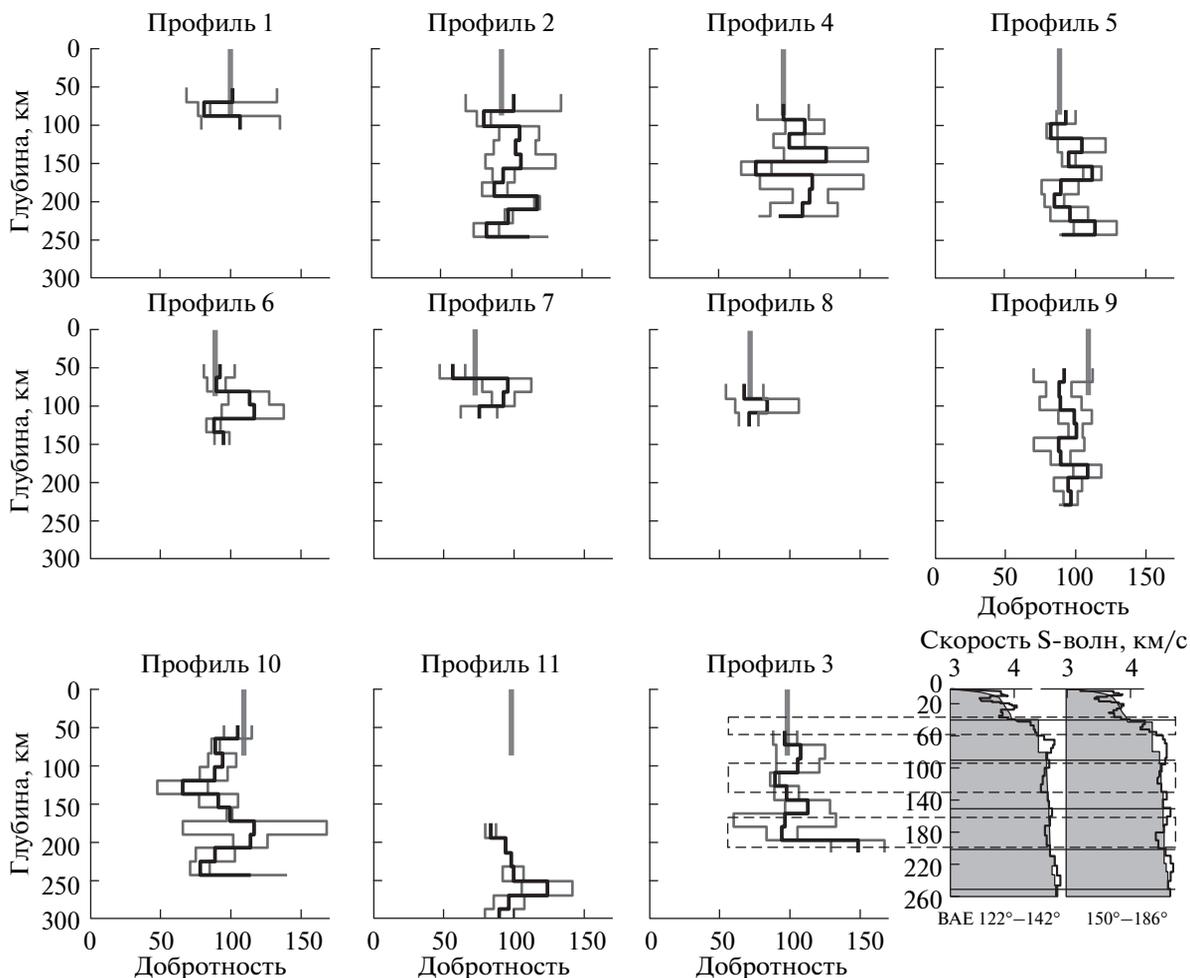


Рис. 2. Локальные глубинные разрезы сейсмической добротности Q_c . Среднеквадратичное отклонение на профилях показано тонкими серыми линиями; серым вертикальным столбиком показано среднее для каждого района значение добротности литосферы до глубины 87 км по [4]. Внизу справа для сравнения с глубинным разрезом добротности приведен разрез скоростей S-волн под станцией NIZ (Нижнеангарск) [14] (справа серым показана референс-модель, штриховыми линиями выделены области высокого затухания и низких скоростей S-волн).

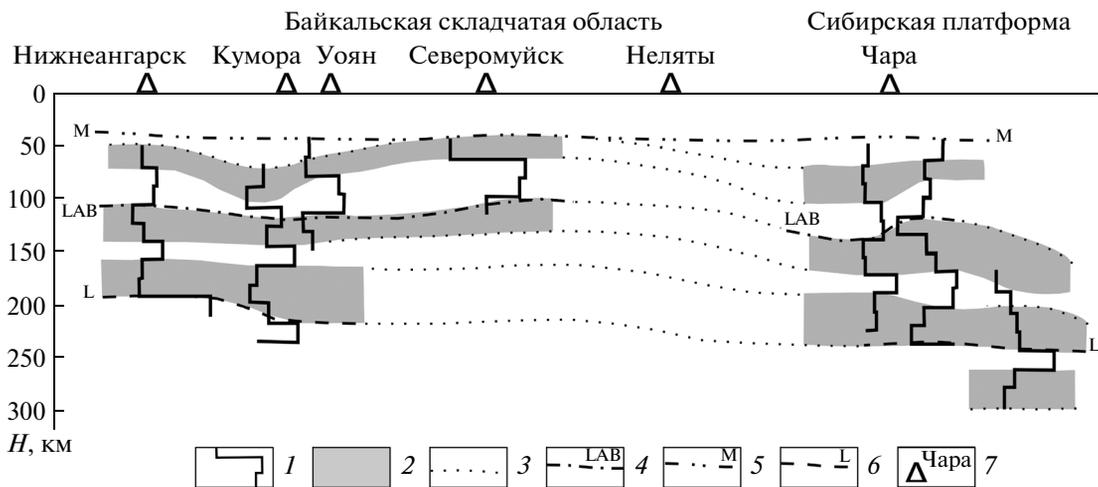


Рис. 3. Схематический разрез литосферы и верхней мантии северо-восточного фланга БРС, основанный на интерполяции данных о поглощении сейсмических кода-волн. Условные обозначения: 1 – кривые сейсмической добротности; 2 – области повышенного затухания сейсмических волн; 3 – предположительные границы области повышенного затухания; 4 – граница между литосферой и астеносферой (LAB); 5 – граница Мохоровичича (M) по данным [11]; 6 – граница Леманн (L); 7 – сейсмические станции и их названия.

щие 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 [11–14]. Анализ скоростных аномалий продольных волн, полученных по результатам телсейсмической 2D-томографии вдоль простирания БРС [13], 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 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 [11]. Подкорковый 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 [12] 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 [15] 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 [14] 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. 2). Оба метода указывают на трехслойное строение астеносферы в регионе. Нижняя граница области пониженных скоростей и высокого затухания сейсмических волн в мантии (граница Леманн) находится на глубине 190–240 км. Слои с повышенным затуханием сейсмических кода-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. 2). Слоям 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 в работе [1] 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 [13, 14], под литосферой северо-восточного фланга БРС такого единого тела не выявляется. 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) и гранта Президента РФ (проект МК 1171.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Logatchev N.A., Zorin Yu.A. // *Tectonophysics*. 1987. V. 143. № 2. P. 225–234.
2. Molnar P., Tapponier P. // *Science*. 1975. V. 189. P. 1959–1982.
3. Саньков В.А., Парфеевец А.В., Лухнев А.В. и др. // *Геотектоника*. 2011. Т. 45. № 5. С. 52–70.

4. Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Добротность литосферы и очаговые параметры землетрясений Прибайкалья. Санкт-Петербург: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2014. 192 с.
5. Dobrynina A.A. // Phys. Earth and Planet. Interior. 2011. V. 188. P. 121–126. doi 10.1016/j.pepi.2011.05.008
6. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 144 с.
7. Дергачев А.А. // Геология и геофизика. 1982. № 6. С. 94–101.
8. Кочетков В.М., Боровик Н.С., Солоненко А.В. и др. Детальные сейсмологические исследования в Северо-Муйском районе. В кн.: Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность. Новосибирск: Наука, 1985. С. 123–178.
9. Копничев Ю.Ф. // ДАН. 1992. Т. 325. № 5. С. 944–948.
10. Pulli J. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1984. V. 74. P. 1149–1166.
11. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах. Новосибирск: Наука, 1993. 199 с.
12. Поснеев А.В. Электропроводность земной коры и мантии западной части Байкало-Амурского региона. В кн.: Астеносфера по комплексу геофизических методов. Киев: Наук. думка, 1988. С. 34–44.
13. Мордвинова В.В. Строение земной коры и верхней мантии Центральной Азии по данным телесеismicческих объемных волн. Автореф. дис. на соискание степени док. геол.-минерал. наук. Иркутск: Ин-т земной коры СО РАН, 2009. 35 с.
14. Ананьин Л.В., Мордвинова В.В., Гоць М.Ф. и др. // ДАН. 2009. Т. 428. № 2. С. 211–214.
15. Priestley K., Debayle E., McKenzie D., et al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 3. B10304. doi 10.1029/2005JB004082