



УДК 282.256.341

Неоднородности поля затухания сейсмических волн на территории Южного Прибайкалья и Забайкалья

А. А. Добрынина

*Институт земной коры СО РАН
Геологический институт СО РАН*

В. А. Саньков

*Институт земной коры СО РАН
Иркутский научный центр СО РАН*

П. А. Предеин

*Геологический институт СО РАН
Бурятский филиал ГС РАН*

В. В. Чечельницкий

*Байкальский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба РАН»*

Ц. А. Тубанов

*Геологический институт СО РАН
Бурятский филиал ГС РАН*

Аннотация. На основе сопоставления латеральных вариаций сейсмической добротности, полученной по объемным продольным P - и поперечным S -волнам, а также по кода-волнам, и макросейсмических эффектов, зарегистрированных при ощутимых землетрясениях последних лет, проведено районирование территории Южного Прибайкалья и Забайкалья по величине затухания сейсмических волн. Выделяется блок Сибирской платформы, характеризующийся низким затуханием сейсмических волн и низким уровнем неоднородности среды. Для Забайкальского и Хамар-Дабанского блоков характерны более высокие значения затухания сейсмических волн и неоднородности среды, максимальные значения этих параметров приурочены к структурам Байкальской рифтовой системы. При этом наблюдается тенденция к значительному (до 60 %) увеличению затухания сейсмических волн при прохождении поперек зон крупных рифтообразующих разломов. Основные черты наблюдаемой картины поглощения сейсмических волн сохраняются в макросейсмических полях ощутимых землетрясений последних лет. Это позволяет с достаточной уверенностью заключить, что наблюдаемые азимутальные вариации макросейсмических проявлений при сильных землетрясениях связаны главным образом с упругими свойствами литосферы и слабо зависят от механизма очага землетрясения и расположения населенных пунктов относительно эпицентра.

Ключевые слова: затухание сейсмических волн, поглощение, добротность, макросейсмический эффект, Байкальская рифтовая система.

Введение

Исторические и современные наблюдения макросейсмических эффектов при сильных землетрясениях свидетельствуют о неравномерном азимутальном распространении сейсмических колебаний, которые связывают с особенностями геологического строения регионов и направленностью излучения в очаге [2; 3; 7; 9; 11; 13–15]. Кроме того, неравномерность макросейсмических проявлений зачастую может быть вызвана с особенностями территориального распределения населенных пунктов, в которых фиксировались эффекты землетрясений. Особенно это актуально для слабозаселенных областей, таких как Сибирь, Забайкалье, Якутия и др. В последние десятилетия широкое развитие получили исследования затухания сейсмических волн, основанные на прямых измерениях. Эти результаты дают независимую информацию и могут использоваться для оценки неоднородности среды, что позволяет выделить главные и второстепенные факторы, определяющие картину волнового поля.

На территории Прибайкалья и Забайкалья измерения сейсмической добротности (Q) среды выполнялись на локальных полигонах. Значения Q были получены с помощью методов преобладающих периодов [8], огибающей сейсмической коды [10; 12] и центральных частот [4]. Для всей Байкальской рифтовой системы и прилегающих территорий оценки затухания были получены по кода-волнам [6; 19; 20]. Эти результаты показали, что поле поглощения сейсмических волн на рассматриваемой территории неоднородно [10; 20].

Настоящая работа посвящена анализу неоднородностей поглощения сейсмических волн в Южном Прибайкалье и Забайкалье и их связи с геологической и неотектонической структурой региона, а также сопоставлению полученных результатов с макросейсмическими проявлениями сильных землетрясений последних лет.

Исследуемый район

Исследуемый район (Южное Прибайкалье и Забайкалье) включает южную часть Сибирской платформы и граничащие с ней районы Саяно-Байкальской складчатой области (рис. 1). Сибирская докембрийская платформа обладает мощной консолидированной литосферой, что контрастирует с относительно утоненной литосферой под Саяно-Байкальской складчатой областью. Последняя представляет собой композицию палеозойских и вендских блоков. В неотектоническом плане структурами первого порядка здесь являются Северо-Евразийская литосферная плита и Амурская литосферная плита, разделенные Байкальской рифтовой системой. В западной и юго-западной частях территории выделяется так называемая зона торошения литосферы, представленная горными сооружениями Восточного Саяна и Тувинского нагорья.



Рис. 1. Неотектоническая схема исследуемого региона.

Обозначения: 1 – Сибирская платформа, 2 – Саяно-Байкальская складчатая область, 3 – кайнозойские впадины: Б – Бусингольская, Д – Дархатская, Х – Хубсугульская, Т – Тункинская, ЮБ – Южно-Байкальская. 4–6 – разломы: 4 – сбросы, 5 – взбросы и надвиги, 6 – сдвиги. Цифрами в кружках показаны генеральные разломы: 1 – Главный Саянский, 2 – Тункинский, 3 – Обручевский, 4 – Приморский. Сейсмические станции показаны треугольниками (региональная сеть Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН) и квадратами (локальная сеть Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН), серым показаны станции, данные которых не использовались в настоящей работе

Современная и позднекайнозойская тектоническая активность сосредоточена главным образом в Байкальской рифтовой системе и структурах Восточного Саяна и Северной Монголии. Байкальская рифтовая система на исследуемой территории представлена своей южной частью – Южно-Байкальской, Тункинской, Хубсугульской, Дархатской и Бусингольской кайнозойскими впадинами (см. рис. 1). С рифтовой системой связана высокая сейсмическая активность, юго-восточная часть территории (Забайкалье) характеризуется рассеянной умеренной сейсмичностью. Сибирская платформа отличается слабой собственной сейсмичностью, для Восточного Саяна наблюдается умеренная концентрированная сейсмичность.

Методы

1. Расчет сейсмической добротности по кода-волнам (Q_c)

Изучение затухания сейсмических кода-волн базировалось на модели однократного рассеяния [17], в рамках которой кода-волны рассматриваются как суперпозиция объемных поперечных волн, отраженных от случайно распределенных в среде неоднородностей. Уменьшение амплитуды коды со временем происходит вследствие затухания энергии и геометрического расхождения. Оно не зависит от характеристик очага землетрясения, эффектов пути и усиления на сейсмостанции. Обычно добротность увеличивается с частотой согласно [23]:

$$Q_c(f) = Q_0 \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^n, \quad (1)$$

где $Q_c(f)$ – добротность среды по коде, Q_0 – добротность на некоторой референтной частоте f_0 (как правило, 1 Гц) и n – частотный параметр, который характеризует степень неоднородности среды и может меняться для разных регионов [18]. Отношение (1) показывает, что затухание сейсмических волн со временем (расстоянием от источника) различно на разных частотах. Амплитуда кода-волны в момент времени t от времени в очаге для сейсмограммы, отфильтрованной на центральной частоте f , связывается с сейсмической добротностью следующим соотношением [17]:

$$A(f, t) = W(f) \cdot t^{-\alpha} \cdot \exp \left[\frac{-\pi f t}{Q_c(f)} \right], \quad (2)$$

где α – характеристика геометрического расхождения (для объемных волн $\alpha = 1$ [26]), $W(f)$ – временная функция источника. Прологарифмировав (2), получим

$$\ln(A(f, t) \cdot t) = \ln(W(f)) - \left[\frac{\pi f t}{Q_c(f)} \right]. \quad (3)$$

Наклон графика зависимости $\ln(A(f, t) \cdot t)$ от времени определяет значение Q для рассматриваемой частоты f . Согласно [25], приведенные выше соотношения действительны для времен, больших, чем удвоенное время пробега S -волны, так как для этих времен очаговым процессом можно пренебречь. В работе для анализа использовались участки коды от момента времени, равного удвоенному времени пробега поперечной волны, и длиной 20 с.

2. Расчет сейсмической добротности по продольным (Q_P) и поперечным (Q_S) волнам

Для оценки затухания прямых объемных волн использовался расширенный метод нормализации к коде [16]. Метод нормализации к коде основан на предположении о том, что энергия коды однородно распределена в области, окружающей очаг землетрясения. Для того чтобы исключить из рассмотрения локальные эффекты в районе сейсмической станции (site-effect), влияние очага и инструментальный отклик, спектральные амплитуды прямых продольных P - и S -волн нормируются на спектральную амплитуду кода-волн (A_C), измеренную для фиксированного временного окна для времен, больших, чем удвоенное время пробега S -волны. Значения добротности Q_P и Q_S оцениваются согласно

$$\ln \left[\frac{A_p(f, r) \cdot r^\alpha}{A_c(f, t_c)} \right]_{r \pm \Delta r} = - \left[\frac{\pi \cdot f}{Q_p(f) \cdot V_p} \right] + \text{const}(f), \quad (4)$$

$$\ln \left[\frac{A_S(f, r) \cdot r^\alpha}{A_C(f, t_C)} \right]_{r \pm \Delta r} = - \left[\frac{\pi \cdot f}{Q_S(f) \cdot V_S} \right] + \text{const}(f), \quad (5)$$

где $A_{P, S}$ – спектральные амплитуды объемных прямых P - и S -волн, измеренные на расстоянии r ; $Q_{P, S}$ – добротность P - и S -волн соответственно; $V_{P, S}$ – средние скорости P - и S -волн соответственно; α – характеристика геометрического расхождения. Наклон графика зависимости $\ln \left[\frac{A_P(f, r) \cdot r^\alpha}{A_C(f, t_C)} \right]_{r \pm \Delta r}$ от ги-

поцентрального расстояния r определяет значение Q для рассматриваемой сейсмической волны [16]. В нашем случае использовались длины окна 5 и 10 с для продольных (P) и поперечных (S) волн соответственно.

Данные

Для оценки параметров затухания сейсмических волн в исследуемом районе использовались данные непрерывной цифровой регистрации, предоставленные постоянными сетями сейсмических станций Байкальского и Бурятского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Станции оборудованы цифровой аппаратурой «Байкал-10, 11», а также «Байкал-7HR» (аналог станций Quanterra Q330HR), разработанной в Геофизической службе СО РАН (Новосибирск). Комплект оборудования включает три короткопериодных сейсмометра (СМ-3, СМ-3КВ), записывающих скорости в диапазоне от 0,01 до 1000 $\mu\text{м/с}$, и три канала низкой чувствительности для записи сильных движений (сейсмометры ОСП-2М). Частота дискретизации составляет 100 отсчетов в секунду, рабочая полоса частот – от 0,5 до 10 Гц (для станций «Байкал-10») и до 20 Гц (для станций «Байкал-11» и «Байкал-7HR»). Для расчета параметров затухания по коде использовались записи 91 регионального землетрясения с энергетическими классами $K = 9,6\text{--}13,7$ (локальная магнитуда $M_L = 3,1\text{--}5,4$). Эпицентральные расстояния менялись в диапазоне от 15 до 200 км (рис. 2). Покрывание региона землетрясениями соответствует пространственному распределению эпицентров землетрясений в Байкальской рифтовой системе, при этом сейсмические трассы «источник – приемник» достаточно хорошо покрывают рифтовые впадины, горные поднятия и южный выступ Сибирской платформы.

Для оценки затухания по прямым волнам использовались записи землетрясений и промышленных взрывов ($K = 8,1\text{--}13,9$, $M_L = 2,3\text{--}5,5$), зарегистрированных сейсмическими станциями Турунтаево (TRT) и Хурамша (HRM). Параметры затухания прямых волн рассчитывались для пяти профилей, пересекающих исследуемую территорию в разных направлениях (табл. 1).

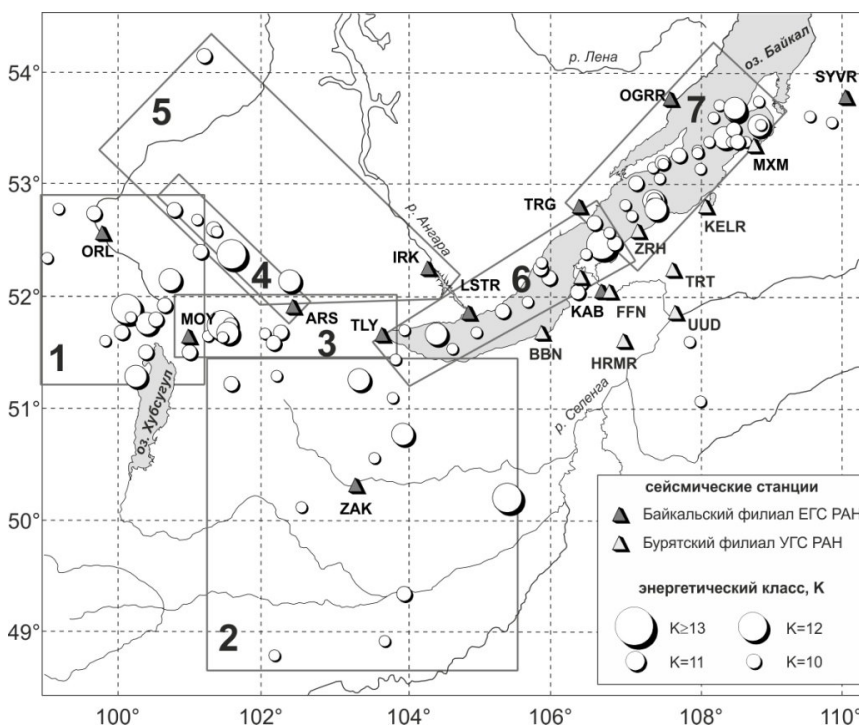


Рис. 2. Взаимное расположение эпицентров выбранных землетрясений и сейсмических станций.

Пронумерованными прямоугольниками показаны отдельные тектонические структуры: 1 – Восточно-Саянское горное поднятие, 2 – Хамар-Дабанский блок, 3 – Тункинская система впадин, 4 – зона Главного Саянского разлома, 5 – Сибирская платформа, 6 – Южно-Байкальская впадина (южная часть), 7 – Южно-Байкальская впадина (северная часть)

Таблица 1

Параметры землетрясений, использованных для расчета значений Q_p и Q_s

Профиль	Az, град.	N	Kmin	Kmax	Dmin, км	Dmax, км
Сейсмическая станция Турунтаево						
1	255	81	8,1	13,9	48	301
2	308	70	8,1	11,8	33	277
3	29	62	8,1	13,1	80	341
4	120	68	8,1	12,1	178	222
5	189	24	8,1	10,5	55	285
Сейсмическая станция Хурамша						
1	270	23	9,3	13,5	90	330
2	344	23	9,1	12,4	56	340
3	36	60	9,1	11,9	100	275
4	100	25	8,7	10,4	62	280
5	180	25	8,4	13,2	65	348

Примечание: в графах 1, 2 даны номер профиля и его средний азимут (градусы), 3 – количество сейсмических событий; 4, 5 – минимальный и максимальный энергетические классы; 6, 7 – минимальное и максимальное эпицентральные расстояния (км).

Результаты и обсуждение

Значения сейсмической добротности для прямых P -, S - и кода-волн получены в частотном диапазоне от 0,2 до 16 Гц. Записи обрабатывались фильтром Баттерворта на шести центральных частотах f : 0,3; 0,75; 1,5; 3,0; 6,0 и 12,0 Гц. При расчетах использовались записи с отношением полезного сигнала к помехе (S/N) не менее 3. Для оценки отношения S/N использовались средние амплитуды сигнала до прихода P -волны (помехи) и средние амплитуды коды (полезный сигнал), отфильтрованные на указанных частотах. Для расчета сейсмической добротности по кода-волнам (Q_C) использовалась программа *CodaQ*, входящая в состав пакета программ *SEISAN* [21]; для расчета характеристик затухания прямых волн использовалась программа *CodaNorm* [24], разработанная авторским коллективом.

Расчеты затухания по кода-волнам проводились двумя способами: 1) для отдельных тектонических структур (горные поднятия Восточного Саяна и Хамар-Дабана, Сибирская платформа, Главный Саянский разлом, Тункинская и Южно-Байкальская рифтовые впадины (см. рис. 2, табл. 2)) и 2) для каждой сейсмической станции в отдельности (выбирались землетрясения, локализованные в областях радиусом до 300 км от станции (рис. 3)). Расчет затухания по прямым волнам выполнялся для специально выбранных направлений (профилей), пересекающих рифтовую систему и прилегающие области в разных азимутах (рис. 4, см. табл. 1). Для дальнейших построений использовались значения сейсмической добротности на частоте 1 Гц, так как именно на этой частоте неоднородности поля поглощения сейсмических волн проявлены наиболее хорошо [1], а также значения частотного параметра и коэффициента затухания (табл. 2, см. рис. 3, 4).

Таблица 2

Параметры затухания по кода-волнам в отдельных тектонических блоках

Номер блока	Название блока	Q_0	s_Q	n	s_n	N
1	Поднятие Восточного Саяна	94	6	0,96	0,04	154
2	Хамар-Дабанское поднятие	121	16	0,84	0,08	84
3	Тункинская впадина	96	7	0,91	0,04	140
4	Главный Саянский разлом	84	7	1,10	0,07	68
5	Сибирская платформа	134	26	0,48	0,12	13
6	Южно-Байкальская впадина	95	11	0,89	0,08	189
7	Центрально-Байкальская впадина	89	5	0,99	0,04	195

Примечание: в графах 1, 2 даны номер и название тектонического блока, для которого выполнен расчет сейсмической добротности по коде; 3 – добротность на частоте 1 Гц; 5 – частотный параметр; 4, 6 – среднеквадратичные отклонения полученных значений Q_0 и n соответственно; 7 – минимальное количество измерений для фиксированной длины окна.

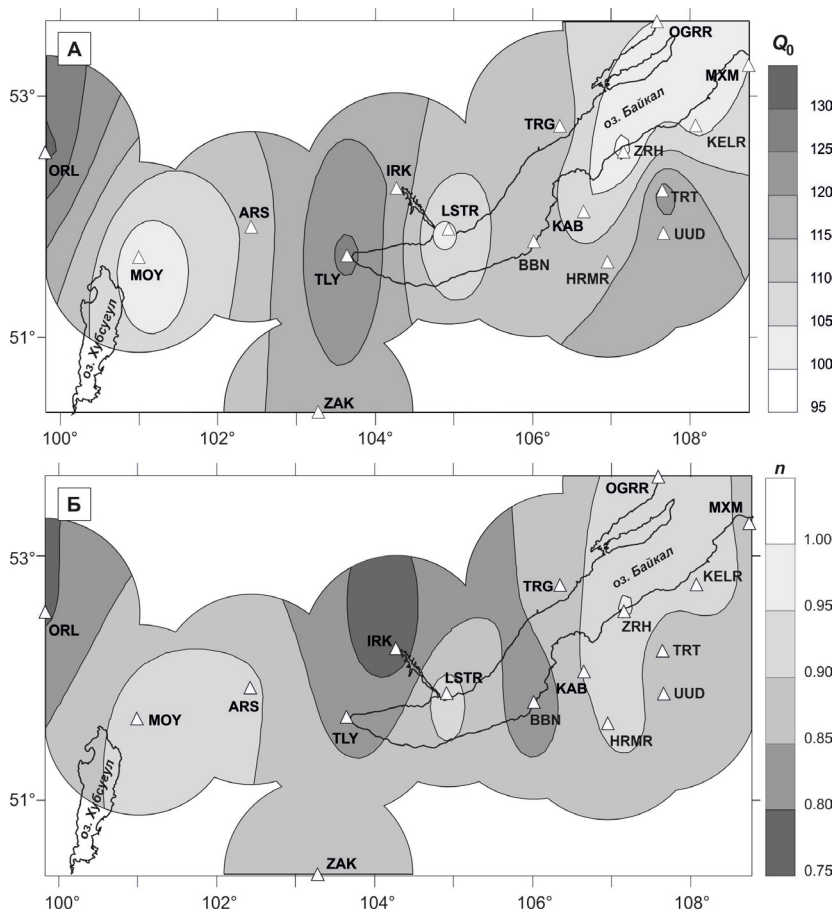


Рис. 3. Латеральные вариации сейсмической добротности на частоте 1 Гц (А) и частотного параметра (Б). Белым показаны области, где нет определений параметров затухания

В результате для территории Южного Прибайкалья и Забайкалья получены определения сейсмической добротности и ее частотной зависимости (частотного параметра) по прямым объемным P -, S - и кода-волнам. Значения сейсмической добротности по коде на частоте 1 Гц варьируются в пределах $84 \div 134$, а частотного параметра – от 0,84 до 1,10 (см. табл. 2). Для прямых P - и S -волн значения добротности и частотного параметра значительно меняются для разных профилей: $Q_P = 32-154$, $n = 0,85-1,39$, $Q_S = 66-360$, $n = 0,62-1,58$ (см. рис. 4).

Значения сейсмической добротности Q_C , полученные в настоящей работе для Байкальской рифтовой системы, удовлетворительно согласуются с определениями ($Q_C = 120 \pm 15$), выполненными по записям слабых землетрясений Южного Байкала и афтершоков Тункинского (Еловского) землетрясения (29 июня 1995 г., $K = 14,5$) [12]. Значения добротности для продольных P -волн хорошо согласуются с аналогичными данными, полученными для Забайкалья с использованием сильного вибросточника: $Q_P = 82-157$ [7].

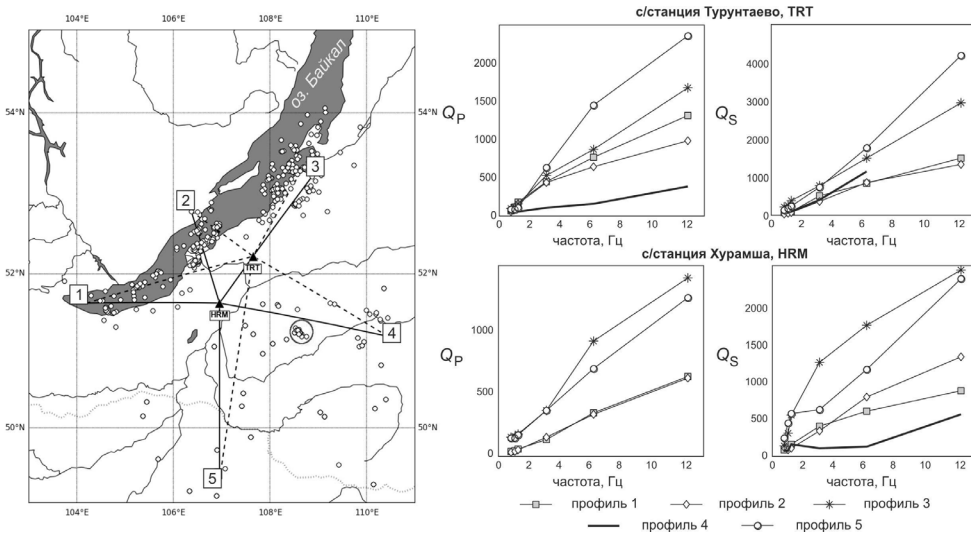


Рис. 4. Слева – положение сейсмических профилей от станций Хурамша (HRM, показаны сплошными линиями) и Турунтаево (TRT, показаны пунктиром). Окружностью выделены эпицентры промышленных взрывов. Справа – зависимости добротности объемных P - и S -волн от частоты для разных профилей

При детальном рассмотрении соотношений параметров затухания для отдельных тектонических блоков отмечаются некоторые важные особенности. Одна из наблюдаемых тенденций состоит в том, что как затухание, так и частотный параметр снижаются для древних стабильных областей, то есть зависят от возраста консолидации земной коры. Для кода-волн максимальные значения Q_0 и минимальные значения n характерны для докембрийской Сибирской платформы (см. табл. 2). Несколько ниже добротность литосферы для нижнепалеозойского Хамар-Дабанского блока (см. табл. 2). Вместе с тем отмечается существенное снижение добротности древних участков коры при внедрении в них процессов рифтогенеза: область сейсмически активного Восточно-Саянского блока, относящегося к вендскому Тувино-Монгольскому микроконтиненту, отличается повышенным затуханием сейсмических волн (см. табл. 2). Те же тенденции прослеживаются при расчете затухания в локальных областях, непосредственно прилегающих к сейсмическим станциям (см. рис. 3). Максимальное затухание и раздробленность среды наблюдаются для кайнозойских рифтовых впадин (Q варьируется в пределах 98–114, $n = 0,87–0,96$, Хамар-Дабанский и Забайкальский блоки характеризуются умеренным затуханием сейсмических волн ($Q = 115–127$, $n = 0,81–0,91$). Горное поднятие Восточного Саяна и Сибирская платформа отличаются наименьшим затуханием сейсмических волн и раздробленностью среды – $Q = 119–131$, $n = 0,76–0,79$ (см. рис. 3).

Те же латеральные неоднородности отмечаются и при анализе затухания объемных P - и S -волн, оценки которого получены для станций Хурамша и Турунтаево (см. рис. 4). Анализ параметров затухания для разнонаправленных профилей выявил следующие тенденции: наименьшее затухание

объемных сейсмических P - и S -волн получено для южной части Забайкальского блока (профиль 5, см. рис. 4). Максимальное затухание наблюдается для профиля 4, проходящего через Забайкальский блок в восточном (юго-восточном) направлении. Высокое затухание для этой относительно стабильной области частично может объясняться использованием при расчете не только землетрясений, но также промышленных взрывов. Известно, что для взрывов характерно наличие высокочастотной составляющей излучения по сравнению с землетрясениями [5], что приводит к более быстрому затуханию сейсмических волн от взрывов на тех же эпицентральных расстояниях.

Для профилей 1 и 2, пересекающих Южно-Байкальскую рифтовую впадину в западном и северо-западном направлениях, наблюдается стабильно высокое затухание как для продольных, так и для поперечных волн (см. рис. 4). Профиль 3, также проходящий частично через северную часть Южно-Байкальской впадины и через Забайкальский блок, характеризуется умеренным затуханием. При этом необходимо отметить, что профили 1 и 2 пересекают Южно-Байкальскую впадину вкrest основных структурных нарушений, в то время как профиль 3 проходит вдоль них. Аналогичные результаты, свидетельствующие о значительном увеличении затухания сейсмических волн при пересечении зон крупных разломов (в среднем на 20–60 % по сравнению с контактирующим блоком), получены в работе [20] для разломов южного обрамления Сибирской платформы – Обручевского, Приморского, Тункинского и Главного Саянского (см. рис. 1), а также в работе [7] при сопоставлении значений затухания для продольных волн от сильного виброисточника, распространяющихся вдоль ($Q_p = 157$) и вкrest ($Q_p = 82$) простирания разломов.

Таким образом, по полученным данным о затухании сейсмических объемных и кода-волн можно заключить, что области кайнозойских рифтовых впадин характеризуются максимальным затуханием сейсмических волн, области горных поднятий Восточного Саяна и Хамар-Дабана, а также Забайкальский блок отличаются умеренным затуханием, в то время как для Сибирской платформы затухание минимально. Полученные результаты хорошо согласуются с классификацией регионов по степени тектонической и сейсмической активности: высокие значения затухания и частотного параметра ($Q < 200$, $n > 0,8$) характерны для регионов с высокой тектонической активностью, средние значения Q и n ($Q = 200–600$, $n = 0,3–0,8$) наблюдаются для регионов с умеренной степенью активности и низкие значения параметров затухания – для стабильных слабосейсмичных или асейсмичных регионов ($Q > 600$, $n < 0,5$) [17; 18; 22; 26].

Полученные характеристики поля поглощения сейсмических волн в литосфере Южного Прибайкалья и Забайкалья сопоставлялись с данными о макросейсмических проявлениях при сильных землетрясениях последних лет (табл. 3).

Таблица 3

Параметры землетрясений со значительными макросейсмическими эффектами [2; 3; 9; 11; 13–15]

Название землетрясения	Дата	Координаты		K	I ₀ , баллы	Источник
		с. ш.	в. д.			
Еловское (Тункинское)	29.06.1995	51,77	102,75	14,0	7,0	[3]
Южно-Байкальское	25.02.1999	51,64	104,82	14,6	8,0	[13]
Усть-Селенгинское	10.10.2001	52,43	106,66	12,8	6,0	[15]
Ольхонское	28.07.2002	52,99	107,71	13,1	6,0	[14]
Култукское	27.08.2008	51,59	104,04	15,9	8,0–9,0	[11]
Максимихинское	20.05.2008	53,29	108,52	14,3	7,0	[2]
Заганское	01.02.2011	50,98	107,85	13,2	6,0–6,5	[9]

Для каждого землетрясения рассчитывались модули градиента балльности (интенсивности сотрясений) в каждом населенном пункте по формуле:

$$|\text{grad}(I)| = \frac{(I_0 - I)}{\Delta}, \quad (6)$$

где I_0 – предполагаемая интенсивность сотрясений в очаге, I – интенсивность в населенном пункте, Δ – эпицентральный расстояние, км. Для удобства сопоставления все значения модулей градиентов нормировались на общий максимум. Таким образом, максимальное значение нормированного модуля градиента балльности составило 1,00, минимальное – 0,12. По полученным значениям нормированных модулей градиентов для каждого землетрясения строились розы-диаграммы (рис. 5). Значения нормированных модулей градиентов были разделены на три группы, согласно величине: 1,00–0,66 – высокий модуль градиента затухания интенсивности сотрясений, 0,66–0,33 – средний и < 0,33 – низкий.

Анализ роз-диаграмм модулей градиентов затухания интенсивности сотрясений при сильных землетрясениях также указывает на существование значительных пространственных вариаций затухания. Для всех землетрясений характерно слабое или умеренное затухание в направлении Сибирской платформы (значения градиента не более 0,33). Исключение составляют Южно-Байкальское и Усть-Селенгинское землетрясения, где наблюдается высокое затухание сотрясений для населенных пунктов, расположенных близ берегов оз. Байкал. Это явление объясняется сильными поглощающими свойствами крупных разломов, ограничивающих борта Южно-Байкальской впадины – Обручевского и Приморского. Также высокое затухание интенсивности сотрясений наблюдается для Усть-Селенгинского землетрясения в южных и восточных румбах, где сейсмические волны проходят через зоны Дельтового и Посольского разломов (см. рис. 5). Для Хамар-Дабанского и Забайкальского блоков характерно умеренное затухание сотрясений, для Восточного Саяна – умеренное и высокое. Слабо затухают сейсмические сотрясения для трасс, проходящих в Южно-Байкальской впадине вдоль основных структурных нарушений.

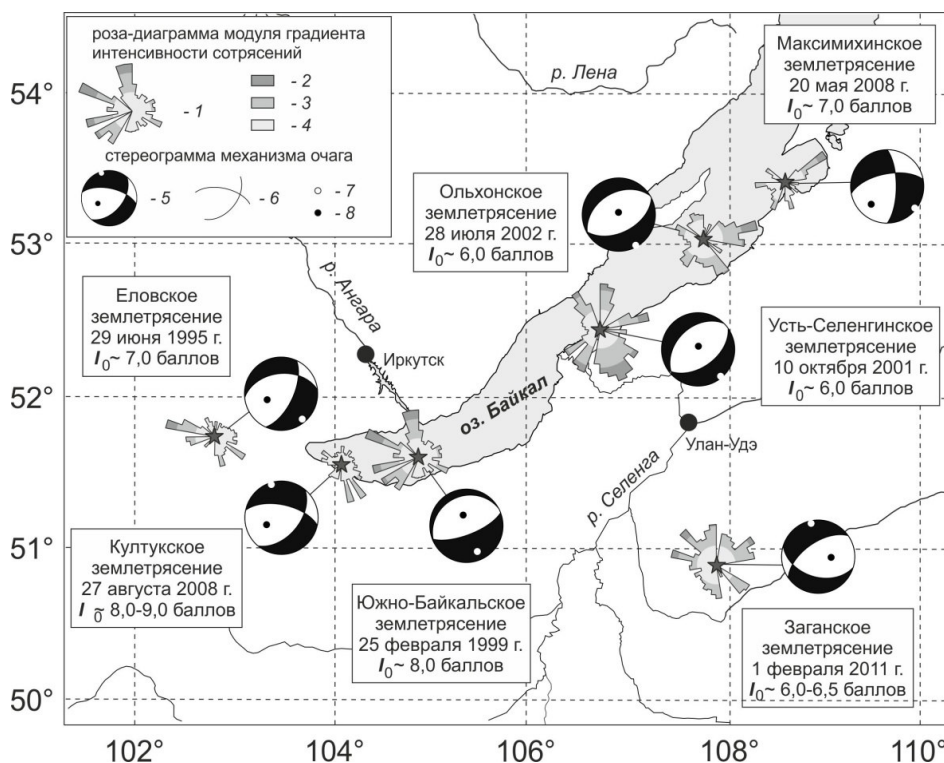


Рис. 5. Розы-диаграммы модуля градиента балльности и механизмы очагов сильных землетрясениях последних лет на территории Южного Прибайкалья и Забайкалья.

Обозначения 1 – роза-диаграмма, 2–4 – величина нормированного градиента балльности (2 – высокий градиент, 3 – средний, 4 – низкий), 5 – механизм очага землетрясения по данным [4], 6 – нодальные плоскости, 7, 8 – точки выхода осей главных напряжений растяжения и сжатия соответственно. Звездочками показаны эпицентры землетрясений

Заключение

Сопоставления латеральных вариаций сейсмической добротности и частотного параметра, характеризующего степень неоднородности среды, с макросейсмическими эффектами, зарегистрированными при ощутимых землетрясениях последних лет, показали, что существует тенденция к дифференциации региона на ряд областей, отличающихся по исследуемым параметрам. Наиболее ярко выделяются области рифтовых впадин (Южно-Байкальская и Тункинская впадины), характеризующиеся повышенным затуханием сейсмических волн и степенью неоднородности среды. По макросейсмическим эффектам эта область также характеризуется высоким градиентом убывания сотрясений от эпицентра (см. рис. 5). Сибирская платформа благодаря своим высоким прочностным свойствам обладает пониженным затуханием сейсмических волн и низким частотным параметром, что подтверждается давно известным фактом далекого распространения сотрясений от сильных землетрясений вглубь платформы от Байкальской сейсмической

зоны (см. рис. 5). В Забайкалье выделяются два крупных блока – Хамар-Дабанский и Улан-Бургасы – Худанский блоки, разделенные Орхон-Селенгинской депрессией и имеющие различные характеристики затухания сейсмических волн. Первый блок и Орхон-Селенгинская депрессия по комплексу параметров отличаются низким затуханием сейсмических волн и низкой степенью неоднородности среды. В то время как для Улан-Бургасы – Худанского блока отмечено высокое поглощение сейсмических волн.

Оценка влияния крупных разломов, ограничивающих рифтогенные впадины и крупные неотектонические блоки, на поглощение сейсмических волн показала, что при распространении сейсмических волн вкострости зон таких разломов наблюдается значительное (до 60 %) увеличение затухания по отношению к другим направлениям. Это хорошо объясняет замеченное ранее снижение сотрясаемости при сильных землетрясениях в населенных пунктах, расположенных непосредственно за зоной таких разломов по отношению к эпицентру землетрясения.

Сопоставление роз-диаграмм градиентов балльности и форм изосейст свидетельствует о том, что механизм очага землетрясения оказывает влияние только на форму первых изосейст, отражая направленность излучения в источнике, в то время как на дальнейшее распространение колебаний оказывают доминирующее влияние свойства среды.

Таким образом, мы можем утверждать, что наблюдаемые азимутальные вариации макросейсмических проявлений при сильных землетрясениях связаны, главным образом, с упругими свойствами литосферы и слабо зависят от механизма очага землетрясения и расположения населенных пунктов относительно эпицентра.

Работа выполнена при поддержке интеграционной программы ФГБУН ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей», направление 3 (проект 3.1).

Список литературы

1. Аптикаева О. И. Тонкая структура литосферы и астеносферы Гармского района и ее связь с сейсмичностью / О. И. Аптикаева, Ю. Ф. Копничев // Докл. акад. наук СССР. – 1991. – № 317(2). – С. 326–330.
2. Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г. с $KP = 14,3$, $M_w = 5,3$, $I_0 = 7$ (Центральный Байкал) / Н. А. Гилева, В. И. Мельникова, Я. Б. Радзиминович, А. И. Середкина // Землетрясения Северной Евразии в 2008 г. – Обнинск : ГС РАН, 2014. – С. 337–345.
3. Голенецкий С. И. Еловское землетрясение 29 июня 1995 г. ($M_S = 5,9$) // Землетрясения Северной Евразии в 1995 г. – М., 2001. – С. 183–187.
4. Дергачев А. А. Методика и результаты определения поглощения сейсмических волн в центральной части Байкальской рифтовой зоны / А. А. Дергачев // Геология и геофизика. – 1982. – № 6. – С. 94–101.
5. Добрынина А. А. Распознавание слабых землетрясений и промышленных взрывов в районе Восточно-Бейского разреза (Хакасия, Россия) / А. А. Добрынина, В. И. Герман // Вестн. НЯЦ РК. – 2016. – В печати.

6. Добрынина А. А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы / А. А. Добрынина, В. В. Чечельницкий, В. А. Саньков // Геология и геофизика. – 2011. – № 5. – С. 712–724.
7. Исследование динамических особенностей сезонных изменений волновых полей при вибросейсмическом мониторинге среды / А. Ф. Еманов [и др.] // Геология и геофизика. – 1999. – № 40(3). – С. 474–486.
8. Жадин В. В. Измерение добротности земной коры по записям микроземлетрясений (на примере Западной Тувы и Байкальской рифтовой зоны) / В. В. Жадин, А. А. Дергачев // Физика Земли. – 1973. – № 2. – С. 17–22.
9. Землетрясения России в 2011 г. – Обнинск : ГС РАН, 2013. – 208 с.
10. Копничев Ю. Ф. Новые данные о строении верхней мантии Байкальской рифтовой системы // Докл. Акад. наук. – 1991. – № 325(5). – С. 944–949.
11. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с $M_w = 6,3$, $I_0 = 8-9$ (Южный Байкал) / В. И. Мельникова, Н. А. Гилева, Я. Б. Радзиминович, А. И. Середкина // Землетрясения Северной Евразии в 2008 г. – Обнинск : ГС РАН, 2014. – С. 386–407.
12. Потапов В. А. Характеристика рассеяния сейсмических волн близких землетрясений в Прибайкалье / В. А. Потапов, В. В. Чечельницкий, Ф. И. Иванов // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI в. – Новосибирск : Наука, 1996. – С. 172–176.
13. Южно-Байкальское землетрясение 25 февраля 1999 г. с $K_p = 14,6$, $I_0 = 8$ (Прибайкалье) / Н. А. Радзиминович, Н. А. Гилева, В. И. Мельникова, О. К. Масальский, Я. Б. Радзиминович, В. В. Ружич, Л. П. Бержинская, А. П. Ордынская, И. А. Емельянова, О. П. Смекалин // Землетрясения Северной Евразии в 1999 г. – Обнинск : ФОП, 2005. – С. 264–279.
14. Ольхонское землетрясение 28 июля 2002 г. с $MPSP = 4,9$, $K_p = 13,1$, $I_0 = 6$ (Прибайкалье) / Я. Б. Радзиминович, Н. А. Гилева, В. И. Мельникова, В. В. Чечельницкий, Р. А. Курушин, М. Г. Кустова // Землетрясения Северной Евразии. – Обнинск : ГС РАН, 2008. – С. 348–356.
15. Усть-Селенгинское землетрясение 10 октября 2001 г. с $MPSP = 4,8$, $K_p = 12,8$, $I_0 = 6$ (Прибайкалье) / Я. Б. Радзиминович, О. К. Масальский, В. В. Ружич, Г. И. Татьков, М. Г. Кустова // Землетрясения Северной Евразии в 2001 г. – Обнинск : ГС РАН, 2007. – С. 345–359.
16. Aki K. Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0,05 to 25 Hz // Phys. Earth Planet. Interiors. – 1980. – N 21. – P. 50–60.
17. Aki K. Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects / K. Aki, B. Chouet // Journal of Geophysical Research. – 1975. – N 80. – P. 3322–3342.
18. Aki K. Source and scattering effects on the spectra of small local earthquakes // Bulletin of Seismological Society of America. – 1981. – N 71. – P. 1687–1700.
19. Dobrynina A. A. Coda-wave attenuation in the Baikal rift system lithosphere // Physics of Earth and Planetary Interiors. – 2011. – N 188. – P. 121–126.
20. Spatial changes of seismic attenuation and multiscale geological heterogeneity in the Baikal Rift and surroundings from analysis of coda waves / A. A. Dobrynina, V. A. Sankov, V. V. Chechelnitsky, J. Déverchère // Tectonophysics. – 2016. – N 675. – P. 50–68.
21. Havskov J. SEISAN: The earthquake analysis softwares for Windows, Solaris and Linux, Version 8.0 / J. Havskov, L. Ottemoller // Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Norway, 2003. – 348 p.
22. CodaQ estimates in the Hong Kong region / S. Mak, L. S. Chan, A. M. Chandler, R. Koo // Journal of Asian Earth Sciences. – 2004. – N 24. – P. 127–136.

23. *Mitchell B.* Regional variation and frequency dependence of Q_b in the crust of the United States // *Bulletin of Seismological Society of America*. – 1981. – N 71. – P. 1531–1538.

24. *CodaNorm*: a software package for the body-wave attenuation calculation by the coda-normalization method / P. A. Predein, A. A. Dobrynina, Ts. A. Tubanov, E. I. German // *SoftwareX*. In press.

25. *Rautian T. G.* The use of coda for determination of the earthquake source spectrum / T. G. Rautian, I. V. Khalturin // *Bulletin of Seismological Society of America*. – 1978. – N 68. – P. 923–948.

26. *Sato H.* *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth* / H. Sato, M. C. Fehler // N. Y. : Springer-Verlag, 1998. – 495 p.

Heterogeneity of Seismic Wave Attenuation on the Southern Pribaikalie and Transbaikalia

A. A. Dobrynina

*Institute of the Earth's Crust SB RAS
Geological Institute SB RAS*

V. A. Sankov

*Institute of the Earth's Crust SB RAS
Irkutsk Scientific Center SB RAS*

P. A. Predein

Geological Institute SB RAS

V. V. Chechelnitzky

Baykal Branch of the Geophysical Survey RAS

Ts. A. Tubanov

Geological Institute SB RAS

Abstract. Zoning according the seismic wave attenuation for the southern Pribaikalie and Transbaikalia area was carried out on the base of lateral variations of seismic quality factor obtained from direct body and coda waves and an information about the macroseismic fields perceptible earthquakes in recent years. Siberian platform block is characterized by low seismic wave attenuation and low level of heterogeneity of the medium. The Transbaikalia and Khamar-Daban blocks are characterized by higher values of attenuation of seismic waves and the heterogeneity of the medium. The highest attenuation is observed in the Baikal rift system's structures. At the same time there is a tendency to a significant (up to 60%) increasing of the seismic wave attenuation for traces crossing areas of the main faults. The main features of the observed pattern of absorption of seismic waves are stored in the macroseismic fields perceptible earthquakes in recent years. This fact allows us to conclude with sufficient certainty that the observed azimuthal variations macroseismic manifestations during strong earthquakes are mainly related to the elastic properties of the lithosphere and weakly dependent on the earthquake focal mechanism and the location of populated areas with respect to the epicenter.

Keywords: attenuation of seismic waves, absorption, quality factor, makroseismics, Baikal rift system.

References

1. Aptikaeva O.I., Kopnichev Yu.F. Fine structure of the lithosphere and the asthenosphere Garm region and its relationship with seismicity [Tonkaja struktura litosfery i astenosfery Garm'skogo rajona i ee svjaz' s sejsmichnost'ju]. *Doklady Earth Sciences – Doklady Akademii Nauk Sssr*, 1991, no 317(2), pp. 326-330.
2. Gileva N.A., Melnikova V.I., Radziminovich J.B., Serechkina A.I. Maksimihinskoe earthquake May 20, 2008 with $K = 14,3$, $M_w = 5,3$, $I_0 = 7$ (Central Baikal) [Maksimihinskoe zemletrjasenie 20 maja 2008 g. s $K = 14,3$, $M_w = 5,3$, $I_0 = 7$ (Central'nyj Bajkal)]. *Zemletrjasenija Severnoj Evrazii, 2008 god* (Earthquakes of Northern Eurasia, 2008). Obninsk, 2014, pp. 337-345.
3. Golenetskii S.I. Elovskoe earthquake June 29, 1995 ($M_S = 5,9$) [Elovskoe zemletrjasenie 29 ijunja 1995 goda ($M_S = 5,9$)]. *Earthquakes of Northern Eurasia in 1995* (Zemletrjasenija Severnoj Evrazii v 1995 godu). Moscow, 2011, pp. 183-187.
4. Dergachov A.A. Methodology and results of the determination of the absorption of seismic waves in the central part of the Baikal Rift Zone [Metodika i rezultaty opredelenija pogloshhenija sejsmicheskikh voln v central'noj chasti Bajkal'skoj riftovoj zony]. *Russian Geology and Geophysics – Geologija I Geofizika*, 1982, no 6, pp. 94-101.
5. Dobrynina A.A., German V.I. Recognition of weak earthquakes and industrial explosions in the area of East Beysky section (Khakassia, Russia) [Raspoznavanie slabyh zemletrjasenij i promyshlennyh vzryvov v rajone Vostochno-Bejskogo razreza (Hakasija, Rossija)]. *Vestnik NNC – Vestnik NJAC RK*, 2016, in press.
6. Dobrynina A.A., Chechelnitzky V.V., Sankov V.A. The seismic quality factor of the lithosphere the southwestern flank of the Baikal Rift System [Sejsmicheskaja dobrotnost' litosfery jugo-zapadnogo flanga Bajkal'skoj riftovoj sistemy]. *Russian Geology and Geophysics – Geologija I Geofizika*, 2011, no 5, pp. 712-724.
7. Emanov A.F., Seleznev V.S., Solovyev V.M. et al. Research of dynamic characteristics of seasonal changes in wave fields at vibroseismic monitoring environment [Issledovanie dinamicheskikh osobennostej sezonnyh izmenenij volnovyh polej pri vibrosejsmicheskom monitoringe sredy]. *Russian Geology and Geophysics – Geologija I Geofizika*, 1999, no 3, pp. 474-486.
8. Zhadin V.V., Dergachev A.A. Measuring quality factor of the Earth's crust to the records mikroearthquakes (on the example of Western Tuva and the Baikal Rift Zone) [Izmerenie dobrotnosti zemnoj kory po zapisjam mikrozemletrjasenij (na primere Zapadnoj Tuvy i Bajkal'skoj riftovoj zony)]. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth – Fizika Zemli*, 1973, no 2, pp. 17-22.
9. *Zemletrjasenija Rossii v 2011 godu* (The earthquakes of Russia in 2011). Obninsk, 2013. 208 p.
10. Kopnichev Yu.F. New data on the structure of the upper mantle of the Baikal Rift System [Novye dannye o stroenii verhnjej mantii Bajkal'skoj riftovoj sistemy]. *Doklady Earth Sciences – Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1991, no 325(5), pp. 944-949.
11. Melnikova V.I., Gileva N.A., Radziminovich J.B., Serechkina A.I. Kultuk earthquake of August 27, 2008 with $M_w = 6,3$, $I_0 = 8 - 9$ (Southern Baikal) [Kultukskoe zemletrjasenie 27 avgusta 2008 g. s $M_w = 6,3$, $I_0 = 8 - 9$ (Juzhnyj Bajkal)]. *Zemletrjasenija Severnoj Evrazii, 2008 god* (Earthquakes of Northern Eurasia, 2008). Obninsk, 2014, pp. 386-407.
12. Potapov V.A., Chechelnitzky V.V., Ivanov F.I. Scattering characteristic of seismic waves near the earth-shocks in Baikal [Harakteristika rassejanija sejsmicheskikh voln

blizkih zemle-trjasenij v Pribajkal'e]. *Geofizicheskie issledovanija v Vostochnoj Sibiri na rubezhe HHI veka* (Geophysical exploration in Eastern Siberia at the turn of the twenty-first century). Novosibirsk, 1996, pp. 172-176.

13. Radziminovich N.A., Gileva N.A., Melnikova V.I., Masalsky O.K., Radziminovich J.B., Ruzhich V.V., Berzhinskaya L.P., Ordynskaya A.P., Emelyanova I.A., Smekalin O.P. South Baikal earthquake of February 25, 1999 with CR = 14,6, I0 = 8 (Baikal) [Juzhno-bajkal'skoe zemletrjasenie 25 fevralja 1999 goda s KR = 14,6, I0 = 8 (Pribajkal'e)]. *Zemletrjasenija Severnoj Evrazii v 1999 godu* (Earthquakes of Northern Eurasia in 1999). Obninsk, 2005, pp. 264-279.

14. Radziminovich J.B., Gileva N.A., Melnikova V.I., Chechelmitsky V.V., Kurushin R.A., Kustova M.G. Olkhonskiye earthquake July 28, 2002 with MPSP = 4,9, KR = 13,1, I0 = 6 (Baikal) [Ol'honskoe zemletrjasenie 28 ijulja 2002 goda s MPSP = 4,9, KR = 13,1, I0 = 6 (Pribajkal'e)]. *Zemletrjasenija Severnoj Evrazii* (Earthquakes of Northern Eurasia). Obninsk, 2008, pp. 348-356.

15. Radziminovich J.B., Masalsky O.K., Ruzhich V.V., Tatkov G.I., Kustova M.G. Ust-Selenga earthquake of October 10, 2001 with MPSP = 4,8, KR = 12,8, I0 = 6 (Baikal) [Ust'-Selenginskoe zemletrjasenie 10 oktjabrja 2001 goda s MPSP = 4,8, KR = 12,8, I0 = 6 (Pribajkal'e)]. *Zemletrjasenija Severnoj Evrazii v 2001 godu* (Earthquakes of Northern Eurasia in 2001). Obninsk, 2007, pp. 345-359.

16. Aki K. Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0,05 to 25 Hz. *Phys. Earth Planet. Interiors*, 1980, no 21, pp. 50-60.

17. Aki K., Chouet B. Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects. *Journal of Geophysical Research*, 1975, no 80, pp. 3322-3342.

18. Aki K. Source and scattering effects on the spectra of small local earthquakes. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1981, no 71, pp. 1687-1700.

19. Dobrynina A.A. Coda-wave attenuation in the Baikal rift system lithosphere. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 2011, no 188, pp. 121-126.

20. Dobrynina A.A., Sankov V.A., Chechelmitsky V.V., Déverchère J. Spatial changes of seismic attenuation and multiscale geological heterogeneity in the Baikal Rift and surroundings from analysis of coda waves. *Tectonophysics*, 2016, no 675, pp. 50-68.

21. Havskov J., Ottemoller L. SEISAN: The earthquake analysis softwares for Windows, Solaris and Linux, Version 8.0. Bergen, 2003. 348 p.

22. Mak S., Chan L.S., Chandler A.M., Koo R. CodaQ estimates in the Hong Kong region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, no 24, pp. 127-136.

23. Mitchell B. Regional variation and frequency dependence of Qb in the crust of the United States. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1981, no 71, pp. 1531-1538.

24. Predein P.A., Dobrynina A.A., Tubanov Ts.A., German E.I. CodaNorm: a software package for the body-wave attenuation calculation by the coda-normalization method. *SoftwareX*, in press.

25. Rautian T.G., Khalturin I.V. The use of coda for determination of the earthquake source spectrum. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1978, no 68, pp. 923-948.

26. Sato H., Fehler M.C. *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*. New York, 1998. 495 p.

Добрынина Анна Александровна
кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

Dobrynina Anna Alexandrovna
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Senior Research Scientist
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033

тел.: (3952) 42-69-00
младший научный сотрудник
Геологический институт СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а
e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

Саньков Владимир Анатольевич
кандидат геолого-минералогических
наук, доцент, заведующий лабораторией
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-69-00
ведущий научный сотрудник
Иркутский научный центр СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134
e-mail: sankov@crust.irk.ru

Предеин Петр Алексеевич
инженер
Геологический институт СО РАН
Бурятский филиал ГС РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а
тел.: (3012) 43-39-55
e-mail: crmpeter@gmail.com

Чечельницкий Владимир Васильевич
кандидат геолого-минералогических
наук, заместитель директора
Байкальский филиал Федерального
исследовательского центра
«Единая геофизическая служба РАН»
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-74-90
e-mail: chechel@crust.irk.ru

Тубанов Цырен Алексеевич
кандидат геолого-минералогических
наук, заведующий лабораторией
Геологический институт СО РАН,
Бурятский филиал ГС РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а
тел.: (3012) 43-39-55
e-mail: geos@gin.bscnet.ru

tel.: (3952) 42-69-00
Junior Research Scientist
Geological Institute SB RAS
6a, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047
e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

Sankov Vladimir Anatolievich
Candidate of Sciences (Geology
and Mineralogy), Associate Professor,
Head of Laboratory
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-69-00
Leading Researcher
Irkutsk Scientific Center SB RAS
134, Lermontov st., Irkutsk, 664033
e-mail: sankov@crust.irk.ru

Predein Petr Alekseevich
Engineer
Geological Institute SB RAS
6a, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047
tel.: (3012) 43-39-55
e-mail: crmpeter@gmail.com

Chechelnitsky Vladimir Vasilievich
Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Vice-Director
Baykal Branch of the Geophysical Survey
RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-74-90
e-mail: chechel@crust.irk.ru

Tubanov Tsyren Alekseevich
Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Head of Laboratory
Geological Institute SB RAS
6a, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047
tel.: (3012) 43-39-55
e-mail: geos@gin.bscnet.ru