



ESTIMATION OF THE ATTENUATION OF SEISMIC WAVES BY CODA ENVELOPES IN REGIONS WITH DIFFERENT GEODYNAMIC REGIMES ON THE EXAMPLE OF THE TIEN SHAN AND THE BAIKAL RIFT

P.A. Predein ^{1,2}✉, Ts.A. Tubanov ^{1,2}

¹ Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

² Buryat Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

ABSTRACT. Evaluation of seismic wave attenuation parameters (Q-factor and frequency parameter) in the lithosphere of the Tien Shan and the Baikal rift was carried out using coda waves of regional earthquakes. Comparison of obtained quality factor values shows that attenuation in the lithosphere of the Tien Shan is stronger than in the Baikal rift. It can be explained by a higher level of heterogeneity of medium.

KEYWORDS: attenuation; quality factor; seismic waves; Baikal rift; Tien Shan

FUNDING: The work was done under the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the state assignments on research topics 075-01471-22, AAAA-A21-121011890033-1) with the use of the data obtained at Large-Scale Research Facilities "Seismic and infrasonic monitoring of the Arctic cryolite zone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation and adjacent areas", and Large-Scale Research Facilities "South Baikal instrumental complex for monitoring of seismic hazard area geodynamics" which is a part of the Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" at the Institute of the Earth's Crust SB RAS.

The facilities of IRIS Data Services, and specifically the IRIS Data Management Center, were used for access to waveforms, related metadata, and derived products used in this study.

SHORT COMMUNICATION

Received: December 9, 2021

Revised: January 21, 2022

Accepted: February 16, 2022

Correspondence: Petr A. Predein, crmpeter@ginst.ru

FOR CITATION: Predein P.A., Tubanov Ts.A., 2022. Estimation of the Attenuation of Seismic Waves by Coda Envelopes in Regions with Different Geodynamic Regimes on the Example of the Tien Shan and the Baikal Rift. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0625. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0625

ОЦЕНКА ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПО ОГИБАЮЩЕЙ КОДЫ В ЛИТОСФЕРЕ РЕГИОНОВ С РАЗНЫМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ НА ПРИМЕРЕ ТЯНЬ-ШАНЯ И БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

П.А. Предеин^{1,2}, Ц.А. Тубанов^{1,2}

¹ Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

² Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Бурятия, Россия

АННОТАЦИЯ. С использованием коды региональных землетрясений получены оценки характеристик затухания сейсмических волн (добротность и частотный параметр) в литосфере Тянь-Шаня и Байкальского рифта. Сопоставление полученных зависимостей добротности от частоты показывает, что затухание сейсмических волн выше в литосфере Тянь-Шаня, что может объясняться большей раздробленностью и неоднородностью среды по сравнению с Байкальским рифтом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: затухание; добротность; сейсмические волны; Байкальский рифт; Тянь-Шань

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственных заданий по темам НИР №075-01471-22, АААА-А21-121011890033-1) с использованием данных, полученных на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» и УНУ «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов», входящей в состав ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

В данной работе использовались средства IRIS Data Services, и в частности Центра управления данными IRIS, для доступа к волновым формам, метаданным и другим производным от них данным.

1. ВВЕДЕНИЕ

Огибающая сейсмической коды является эффективным инструментом оценки физических параметров неоднородностей среды в разных масштабах. Исследование параметров огибающей позволяет определять физические характеристики, такие как поглощение и рассеяние энергии, для выявления региональных различий неоднородностей среды в разных регионах мира. В работе [Dobrynina et al., 2016] показано, что под воздействием активных геодинамических процессов происходит модификация литосферы (тектоническое деформирование среды, флюидизация, магматические процессы и пр.), что находит свое отражение в изменениях характеристик затухания сейсмических волн (таких, как коэффициент затухания и частотный параметр) в зонах динамического влияния активных структур. Вместе с тем в разных геодинамических условиях соотношение факторов, влияющих на модификацию литосферы, различно, так же как и мощность литосферы, сейсмическая активность, тепловой поток.

Настоящая работа посвящена оценке и сопоставлению затухания сейсмических волн в литосфере регионов с разным тектоническим режимом. Тянь-Шань представляет собой зону сжатия, располагающуюся между Казахским щитом и Таримским блоком, здесь преобладают очаги землетрясений взбросового и сдвигового типа. Байкальский рифт представляет собой зону континентального растяжения на границе Североевразийской и Амурской литосферных плит. Преобладающим типом механизмов очагов является сбросовый.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

Использованный каталог землетрясений Тянь-Шаня включал 79 событий с m_b от 2.5 до 5.0, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях от 30 до 450 км от станции Симигандж (международный код SIMI, координаты 38.66 с.ш., 69.01 в.д.) за 2016–2019 гг. Станция расположена в непосредственной близости от Гармской зоны, для которой в работе [Rautian et al., 1981] приведены оценки добротности для Средней Азии. Очаги землетрясений в регионе могут залегать на глубине более 100 км, в данной работе использовались коровые события с гипоцентрами до 70 км. Частота дискретизации записей, находящихся в свободном доступе, составляет 40 Гц, данные получены по протоколу FDSN.

Для Байкальского рифта рассматривались землетрясения, локализованные в пределах Южнобайкальской впадины и на прилегающих к ней территориях. Использовались записи по станциям локальной сети Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН Максимиха (МХМВ), Улан-Удэ (UUDV), Хурамша (HRMR) с частотой дискретизации 100 Гц и по станции Талая (TLY), международная сеть IRIS, дискретизация 20 Гц. Использовались данные землетрясений на эпицентральных расстояниях до 500 км за 2017–2021 гг. Каталог включал 497 землетрясений в диапазоне магнитуд 2.5–5.5, глубина гипоцентров для землетрясений региона оценивается в пределах 10–25 км [Suvorov, Tubanov, 2008].

Для оценки затухания по кода-волнам использовалась классическая методика, опирающаяся на модель

однократного рассеяния К. Аки и подробно описанная в работах [Aki, Chouet, 1975; Sato, 1977; Rautian et al., 1981; Dobrynina et al., 2011; и мн. др.]. При расчетах, чтобы пренебречь влиянием очагового процесса, за начало коды принималось время двойного пробега поперечной волны ($2T_s$) для диапазона частот от 0.5 до 16 Гц, для частот до 0.5 Гц – $2.5T_s$, выше 16 Гц – $1.5T_s$ аналогично использованному соотношению времени выхода огибающей коды на асимптоту к времени пробега S-волны из работы [Rautian et al., 1981]. Длина окна коды, используемая для расчета на эпицентральных расстояниях до 500 км, 60–120 с, что соответствует «литосферной» ветви огибающей или «поздней» коде из работы Т.Г. Раутиан.

Предварительно записи проверялись на наложение сигнала от другого землетрясения или наличие помех на анализируемом участке коды. Соотношение сигнал – шум для отрезка длиной 5 с в конце участка кода-волн и до вступления Р-волны должно составлять не менее 3. Для получения стабильных огибающих, аппроксимирующих максимальные амплитуды в коде, использовалась формула:

$$A(t, f) = \sqrt{v(t)^2 + h(t)^2}, \quad (1)$$

где $v(t)$ – амплитуды скорости смещения грунта с введенной поправкой на амплитудно-частотную характеристику канала, $h(t)$ – преобразование Гильберта. Из-за постоянной разности фаз $\pm\pi/2$ между спектральными составляющими исходного сигнала и его преобразованием Гильберта полученная огибающая представляет собой касательную к пиковым амплитудам исходного сигнала. Алгоритмы обработки были реализованы на языке программирования Python 3.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате получены значения добротности по коде Q_c для семи октавных частотных полос в диапазоне 0.3–16 Гц для Тянь-Шаня и частотного диапазона от 0.1 до 32 Гц и длины окна обработки коды 60, 90 и 120 с для области Южнобайкальской впадины и прилегающих территорий. Значения Q_c существенно меняются в зависимости от частоты и длины окна, выбранной для обработки коды: как правило, с увеличением частоты и длины окна добротность увеличивается. Первое связывается с тем, что Q_c является частотно-зависимой (для частот выше 1 Гц), второе обычно

интерпретируется как увеличение добротности с глубиной, так как с ростом скорости сейсмических волн и плотности среды увеличивается ее добротность (затухание уменьшается).

С помощью полученных значений Q_c для всех длин окон были определены эмпирические зависимости добротности от частоты в диапазоне 0.3–16 Гц (табл. 1) согласно степенному закону [Mitchell, 1981]:

$$Q_c(f) = Q_0 \cdot f^n, \quad (2)$$

где $Q_c(f)$ – сейсмическая добротность, Q_0 – ее величина на частоте 1 Гц и n – показатель зависимости добротности от частоты или частотный параметр, характеризующий степень неоднородности среды.

Полученные оценки добротности для Тянь-Шаня сопоставлялись с результатами исследований Т.Г. Раутиан, для сравнения использовались аналогичные параметры расчета [Rautian et al., 1981]: величина геометрического расхождения 0.75, частотный диапазон от 0.14 до 10 Гц и длина коды, соответствующие ветви «с» (литосферная) в указанной работе [Rautian et al., 1981] (рис. 1, а).

В целом, для литосферы Средней Азии получено хорошее совпадение установленной нами зависимости $Q_c(f) = 307 \pm 17 \cdot f^{0.62}$ и зависимости в работе [Rautian et al., 1981]: $Q_c(f) = 370 \pm 45 \cdot f^{0.5}$ (рис. 1, а). Наибольший разброс наблюдается в частотном диапазоне до 1 Гц, для которого ввиду преобладания поверхностных волн увеличение поверхности волнового фронта может отличаться от сферического [Fehler, Sato, 2003].

Для всех станций наблюдается рост величины добротности Q_0 и уменьшение значения частотного параметра n с увеличением окна обработки коды. Отклонение от этой тенденции находится в пределах ошибки измерения. Сопоставление зависимости добротности от частоты для Тянь-Шаня ($Q_c(f) = 307 \pm 17 \cdot f^{0.62}$) и средней для Байкальского региона ($Q_c(f) = 501 \pm 17 \cdot f^{0.45}$) показывает, что в целом поглощение сейсмических волн в литосфере Тянь-Шаня выше, как и неоднородность среды, характеризующаяся частотным параметром (рис. 1, б). Только для станции Талая (TLY), находящейся в районе Южного Байкала, его величина сопоставима с Тянь-Шанем. Более сильное затухание сейсмических волн в литосфере Тянь-Шаня можно объяснить большей раздробленностью и неоднородностью среды.

Таблица 1. Зависимость добротности Q_c от частоты для длины окна коды 60, 90 и 120 с

Table 1. Q -factor dependence on frequency for the coda window length of 60, 90 and 120 s

Код станции	60 с		90 с		120 с		Сейсмометр
	Q_0	n	Q_0	n	Q_0	n	
HRMR	498±26	0.44	498±26	0.45	523±19	0.42	Güralp CMG-40T
MXMB	370±14	0.55	479±19	0.45	563±21	0.4	Güralp CMG-40T
TLY	361±29	0.79	445±19	0.56	434±15	0.58	Streckeisen STS-2.5
UADB	331±22	0.64	476±16	0.42	485±14	0.41	Trillium Compact 120
SIMI	264±19	0.74	295±19	0.65	307±17	0.62	Trillium 240

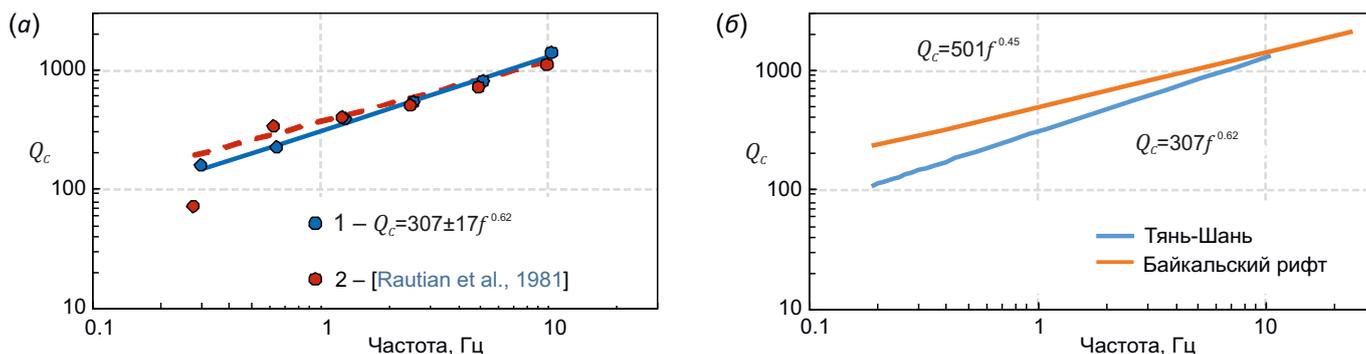


Рис. 1. Сопоставление значений Q_c для длины окна 120 с и их эмпирических зависимостей от частоты: (а) – для Тянь-Шаня в настоящей работе (1) и по данным [Rautian et al., 1981] (2); (б) – эмпирические зависимости для Тянь-Шаня и Байкальского рифта.

Fig. 1. Comparison of Q_c for 120 second coda window length and its empirical dependence on the frequency: (a) – for the Tien Shan (1 – this work, and 2 – after [Rautian et al., 1981]); (б) – empirical dependence for the Tien Shan and the Baikal rift.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены оценки характеристик затухания сейсмических волн (сейсмическая добротность и частотный параметр) в литосфере Тянь-Шаня и Байкальского рифта. Сопоставление полученных зависимостей добротности от частоты показывает, что поглощение сейсмических волн в литосфере Тянь-Шаня выше, как и неоднородность среды, характеризующаяся частотным параметром. Более сильное затухание сейсмических волн в литосфере Тянь-Шаня связано с большей раздробленностью среды по сравнению с Байкальским рифтом.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

6. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aki K., Chouet B., 1975. Origin of Coda Waves: Source, Attenuation, and Scattering Effects. *Journal of Geophysical Research* 80 (23), 3322–3342. <https://doi.org/10.1029/JB080i023p03322>.

Dobrynina A.A., Chechel'nitskii V.V., Sankov V.A., 2011. Seismic Quality Factor of the Lithosphere of the Southwestern

F flank of the Baikal Rift System. *Russian Geology and Geophysics* 52 (5), 555–564. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.04.008>.

Dobrynina A.A., Sankov V.A., Chechel'nitsky V.V., 2016. Spatial Changes of Seismic Attenuation and Multiscale Geological Heterogeneity in the Baikal Rift and Surroundings from Analysis of Coda Waves. *Tectonophysics* 675, 50–68. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.010>.

Fehler M., Sato H., 2003. Coda. *Pure and Applied Geophysics* 160, 541–554. <https://doi.org/10.1007/PL00012549>.

Mitchell B.J., 1981. Regional Variation and Frequency Dependence of Q_β in the Crust of the United States. *Bulletin of the Seismological Society of America* 71 (5), 1531–1538. <https://doi.org/10.1785/BSSA0710051531>.

Rautian T.G., Halturin V.I., Zakirov M.S., Zemtsov A.G., Proskurin A.P., Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.N., Sinel'nikova L.G., Filina A.G., Shengeliya I.S., 1981. Experimental Studies of the Seismic Coda. *Nauka, Moscow*, 142 p. (in Russian) [Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С., Земцова А.Г., Проскурин А.П., Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.Н., Синельникова Л.Г., Филина А.Г., Шенгелия И.С. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 142 с.].

Sato H., 1977. Energy Propagation Including Scattering Effects Single Isotropic Scattering Approximation. *Journal of Physics of the Earth* 25 (1), 27–41. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.25.27>.

Suvorov V.D., Tubanov Ts.A., 2008. Distribution of Local Earthquakes in the Crust beneath Central Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 49 (8), 805–819 (in Russian) [Суворов В.Д., Тубанов Ц.А. Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под центральным Байкалом // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 8. С. 805–819].