

УДК 550.344.094.43

ЗАТУХАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В РАЙОНЕ БУРЕЙСКОЙ ГЭС И ЕГО СВЯЗЬ С РЕЗОНАНСНЫМИ ЭФФЕКТАМИ

¹Пупатенко В.В., ^{1,2}Рябинкин К.С.

¹Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск,
e-mail: pvv2.dv@gmail.com;

²Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, e-mail: kostya-rowan@mail.ru

По записям кода-волн локальных землетрясений получены количественные характеристики затухания сейсмических волн (сейсмическая добротность Q и частотный параметр n) в литосфере Буреинского массива в районе Бурейской ГЭС. Выявлено увеличение вычисляемых значений сейсмической добротности при увеличении длины окна обработки кода-волн, что связано с большей однородностью мантии. Полученные значения сейсмической добротности не выходят за рамки стандартной модели и с высокой точностью аппроксимируются степенной функцией. Обнаружен эффект «анизотропии» сейсмической добротности, т.е. значения добротности и частотного параметра существенно отличаются для разных компонент. Ранее похожий эффект был зарегистрирован в смещении резонансных частот на разных компонентах сейсмических записей. Оба эффекта могут быть следствием структурирования геологической среды в результате постоянных вибрационных воздействий агрегатов ГЭС. Надёжно выделяемых вариаций, присущих отдельным станциям или группам трасс источник-приёмник, не обнаружено. Полученные значения сейсмической добротности ($Q = 77 \pm 3$ на частоте 1 Гц при длине окна 20 с) характерны для регионов с высокой тектонической активностью и свидетельствуют о высоком сейсмическом потенциале исследуемой территории.

Ключевые слова: Бурейская ГЭС, добротность, кода-волны, затухание, анизотропия

SEISMIC WAVE ATTENUATION NEAR THE BUREYA HYDROPOWER STATION AND ITS CONNECTION WITH THE RESONANCE EFFECTS

¹Pupatenko V.V., ^{1,2}Ryabinkin K.S.

¹Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, RAS,
Khabarovsk, e-mail: pvv2.dv@gmail.com;

²Pacific National University, Khabarovsk, e-mail: kostya-rowan@mail.ru

The numeric parameters of the seismic wave attenuation: seismic quality (Q) and frequency factor (n) are calculated using the S-coda waves records of the local earthquakes for the lithosphere of Bureya Massif near the Bureya Hydropower Station. The increment of the calculated values of seismic quality with the increment of the length of the coda wave window is found, which is related to the greater homogeneity of mantle. The calculated values of the seismic quality correspond well to the standard model and can be precisely fitted by power function. The «anisotropy» of the seismic quality is found, which means that the values of seismic quality and frequency factor strongly differ for the different components. The similar effect has been found recently as a shift of the resonant frequencies on the different components of the seismic records. The both effects can be results of structuration of the geological media due to constant vibration influence of power plant units. Reliable variations inherent to individual stations or groups of traces source-receiver was not found. The calculated values of the seismic quality ($Q = 77 \pm 3$ for the 1 Hz frequency and the 20-s window length of coda waves) are common for the regions with high tectonic activity and indicate the high seismic potential of this area.

Keywords: Bureya Hydropower Station, seismic quality, coda waves, attenuation, anisotropy

Одной из задач сейсмологии является изучение процессов подготовки землетрясений, включая наблюдение за процессами накопления и разрядки напряжений [1]. Гидроэлектростанции (ГЭС), как одни из наиболее потенциально опасных техногенных сооружений, находятся под пристальным сейсмологическим контролем. Заполнение водохранилища, периодические изменения уровня воды, мощное вибрационное воздействие турбин и гидроагрегатов, несомненно, оказывают влияние на локальную сейсмичность, хотя остаются дискуссионными вопросы о том, могут ли такие воздействия привести к возникновению более сильных землетрясений

или только инициировать уже готовящиеся землетрясения [2].

Объект исследования в настоящей работе – Буреинский массив в районе Бурейской ГЭС. Локальная сейсмическая сеть Бурейской ГЭС с линейными размерами порядка 20 км включает шесть станций (рис. 1), из которых с конца 2011 г. одновременно работали три-пять. На станциях установлены регистраторы REFTEK 130-01 и короткопериодные датчики GS-1. Детальные сейсмические наблюдения начались уже после заполнения водохранилища, что осложняет интерпретацию наблюдаемых особенностей сейсмического процесса и реакции геологической среды

на землетрясения. Тем не менее район Бурейской ГЭС представляет собой естественный геодинамический полигон для наблюдения за напряжённо-деформируемым состоянием блоков земной коры.

Ранее на сейсмостанциях локальной сети Бурейской ГЭС нами были обнаружены эффекты искажения спектрального состава сейсмических колебаний от близких землетрясений [3]. На многих сейсмических записях наблюдается перераспределение энергии сейсмических волн из низкочастотной в высокочастотную (10–20 Гц и выше) область. Обнаруженные эффекты были интерпретированы как следствие блокового строения земной коры. Оценка размеров блоков, исходя из наблюдаемых нелинейных эффектов (резонансы и геоакустическая эмиссия) оказалась близка к имеющимся определениям по геологическим данным. Позднее было обнаружено, что искажение спектрального состава характерно также и для удалённых землетрясений с эпицентрными расстояниями до 300 км [4].

Одним из аномальных эффектов, визуально наблюдаемых на записях многих локальных землетрясений в районе Бурейской ГЭС, является длительное затухание высокочастотных колебаний [3]. Для оценки и изучения этого эффекта необходимо получить количественные характеристики затухания сейсмических волн, в первую очередь значения сейсмической добротности и её зависимость от частоты. Данные о характеристиках затухания сейсмических волн в регионе исследований, кроме первых предварительных результатов [4], практически отсутствуют.

Цель работы – изучение затухания сейсмических волн в районе Бурейской ГЭС и поиск связи между резонансными эффектами и интенсивностью затухания сейсмических волн.

Материалы и методы исследования

Затухание сейсмических волн в геологической среде характеризуется безразмерной величиной Q , называемой сейсмической добротностью. Этот параметр определяет макросейсмические проявления, вызываемые сильными землетрясениями, и используется для расчёта синтетических сейсмограмм и оценки сейсмической опасности.

Сейсмическую добротность чаще всего измеряют, используя искусственные или естественные источники колебаний, к последним относятся записи объёмных про-

долных, поперечных и кода-волн землетрясений. В работе для измерения добротности используются записи коды S-волн.

Добротность по коду S-волн определяется в соответствии с моделью однократного рассеяния [5], согласно которой кода-волны представляют собой суперпозицию отражений объёмных волн от расположенных случайным образом неоднородностей. Относительное уменьшение амплитуды со временем происходит из-за геометрического расхождения и потери сейсмической энергии и не зависит от пути распространения волн и способа их регистрации.

Добротность увеличивается с частотой, поэтому её обычно записывают в виде

$$Q(f) = Q_0 \cdot (f/f_0)^n,$$

где $Q(f)$ – добротность среды по коду; Q_0 – добротность на частоте f_0 (чаще всего 1 Гц); n – частотный параметр, характерный для данного региона и обычно близкий к единице.

Амплитуда объёмных кода-волн связана с добротностью и временем следующим образом [5]:

$$A(f, t) = W(f) \cdot t^{-1} \cdot \exp\left[\frac{-\pi \cdot f \cdot t}{Q(f)}\right],$$

где $W(f)$ – функция источника; t – время относительно времени в очаге землетрясения. После логарифмирования получается выражение

$$\ln[A(f, t) \cdot t] = \ln[W(f)] - \frac{\pi \cdot f \cdot t}{Q(f)},$$

которое можно, зафиксировав частоту f , использовать для определения значения Q .

Для расчётов были отобраны записи колебаний на шести станциях от 82 землетрясений, произошедших с октября 2011 г. до сентября 2014 г., с эпицентрными расстоянием до 140 км.

Поскольку одной из целей было найти связь между затуханием и резонансными эффектами, значения добротности рассчитывались в узких частотных диапазонах шириной 1 Гц с центральными частотами от 2 до 44 Гц с шагом 1 Гц. По этой же причине сейсмограммы на каждом канале анализировались отдельно. Начало окна для обработки коды соответствовало удвоенному времени пробега S-волны, а длина окна выбиралась равной 20, 25, 30, 35 и 40 с. Для контроля качества записи кода-волн использовались соотношение сигнал/шум (не ме-

нее 3) и значение коэффициента корреляции (не менее 0,5). Пригодными для обработки оказались около 220 пар эпицентр-станция (рис. 1), в зависимости от длины окна. Пример определения одного значения сейсмической добротности приведён на рис. 2.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные значения добротности для длин окна 20, 30 и 40 с для северной (NS) и вертикальной (UD) компонент показаны на рис. 3, вместе с аппроксимацией зависимости $Q(f)$ степенной функцией и 95%-ными ошибками определения параметров. Значения добротности Q и частотного параметра n для трёх компонент и всех длин окна приведены в таблице.

Полученные значения добротности и частотного параметра ($Q = (77 \pm 3) \cdot f^{0,858 \pm 0,011}$, при длине волны 20 с, измеренные по вертикальной компоненте) являются типичными для многих тектонически активных регионов, например для Байкальской рифтовой системы [7] ($Q = (105 \pm 9) \cdot f^{0,90 \pm 0,06}$) или для региона Кач в Индии [8] ($Q = (148 \pm 3) \cdot f^{1,01 \pm 0,02}$). Такие низкие значения добротности свидетельствуют о высоком сейсмическом потенциале исследуемой территории.

Как видно из рис. 3 и таблицы, добротность сильно зависит не только от частоты, но и от длины окна обработки кода-волн.

Причина такой зависимости заключается, по-видимому, в том, что примененный способ измерения добротности характеризует определенный объём среды, который при увеличении временного окна расширяется как в горизонтальной плоскости, так и в глубину, уходя в мантию, которая в целом значительно более однородна. Аналогичный эффект отмечен, например, в работе [7], где приведены результаты исследования добротности литосферы в Прибайкалье.

Как видно из рис. 1, большинство использованных трасс источник-приёмник находятся к востоку от сейсмической сети. Ещё две группы трасс представлены землетрясениями с эпицентрами, расположенными непосредственно в районе сейсмической сети и к северо-северо-востоку на расстояниях до 70 км. Остальные трассы представлены единичными землетрясениями. Недостаточная пространственная равномерность расположения трасс источник-приёмник позволила надёжно получить только общие, усреднённые оценки сейсмической добротности. Но при этом точность аппроксимации оказалась достаточно высокой, средняя относительная ошибка добротности на частоте 1 Гц – 2,9%, частотного параметра – 1,1%. Надёжно выделить вариации, присущие отдельным станциям или группам трасс источник-приёмник, не представляется возможным.

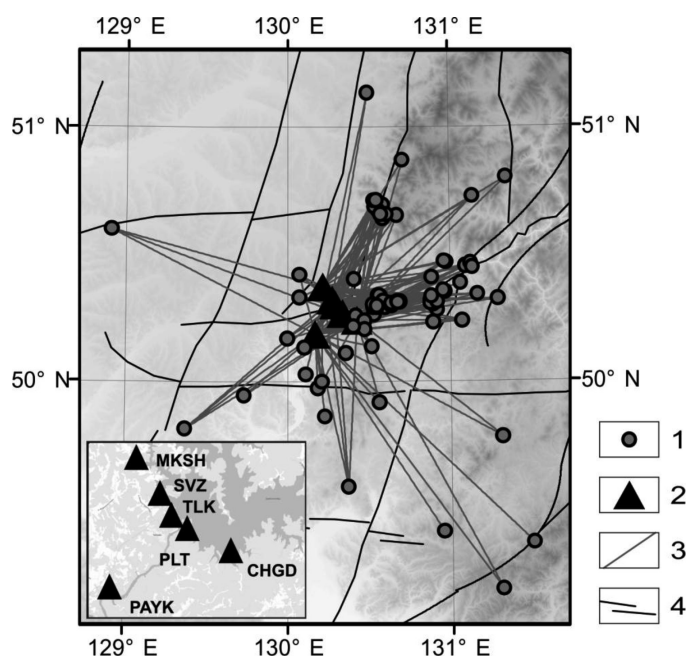


Рис. 1. Карта трасс источник-приёмник: 1 – эпицентры землетрясений; 2 – сейсмостанции (коды указаны на врезке); 3 – трассы источник-приёмник; 4 – основные разломы по [6]

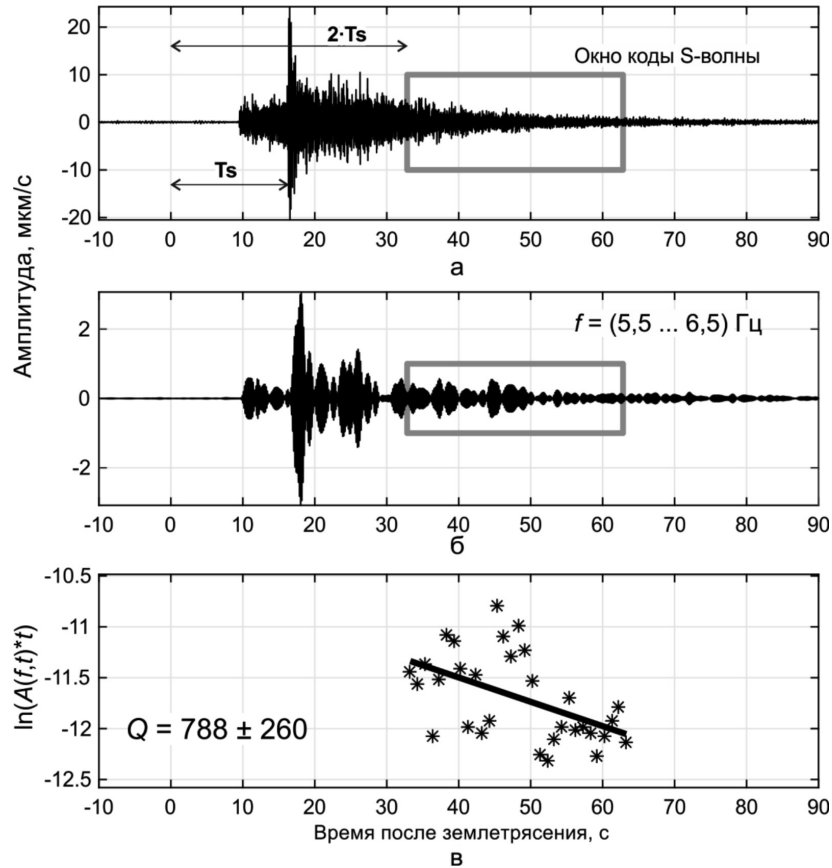


Рис. 2. Пример определения единичного значения сейсмической добротности: а – исходная сейсмограмма; б – фильтрованная сейсмограмма в диапазоне частот 5,5–6,5 Гц; в – пример расчета добротности, где звездочками показаны измерения амплитуды $\ln(A(t) \cdot t)$, линией – линейная аппроксимация зависимости $\ln(A(f, t) \cdot t)$ от времени t

Добротность и частотный параметр для различных компонент и длин окон

Длина окна (W), с	Добротность на частоте 1 Гц (Q)			Частотный параметр (n)		
	NS	EW	UD	NS	EW	UD
20	$71,8 \pm 2,4$	$74,8 \pm 2,5$	$77,4 \pm 2,9$	$0,872 \pm 0,010$	$0,856 \pm 0,010$	$0,858 \pm 0,011$
25	$93 \pm 2,7$	$93,8 \pm 2,8$	$113,4 \pm 3,8$	$0,838 \pm 0,009$	$0,834 \pm 0,009$	$0,790 \pm 0,010$
30	$128,2 \pm 3,4$	$122 \pm 3,4$	$146,7 \pm 4,6$	$0,771 \pm 0,008$	$0,784 \pm 0,008$	$0,742 \pm 0,009$
35	$160,3 \pm 3,9$	$148,5 \pm 3,7$	$178,3 \pm 5,1$	$0,724 \pm 0,007$	$0,746 \pm 0,007$	$0,703 \pm 0,008$
40	$179,2 \pm 4,3$	$175,4 \pm 4,2$	$206,9 \pm 5,6$	$0,703 \pm 0,007$	$0,711 \pm 0,007$	$0,671 \pm 0,008$

Примечание. NS – компонента север-юг; EW – компонента восток-запад; UD – вертикальная компонента. Ошибки указаны с 95%-ной вероятностью.

Полученные значения добротности соответствуют стандартной модели, предполагающей степенную зависимость добротности от частоты, и позволяют утверждать об отсутствии аномально длительного затухания высокочастотных колебаний. Существенных отклонений значений добротности в каком-либо узком частотном диапазоне не зафиксировано. Исключение составляет

определение Q на частоте 16–20 Гц на вертикальной компоненте при длине окна 20 с, где добротность завышена на 5–10%. Это могло бы быть подтверждением связи резонансных эффектов и затухания (частотный диапазон совпадает с резонансными частотами на вертикальных компонентах сейсмограмм), но при других длинах окон этот эффект отсутствует.

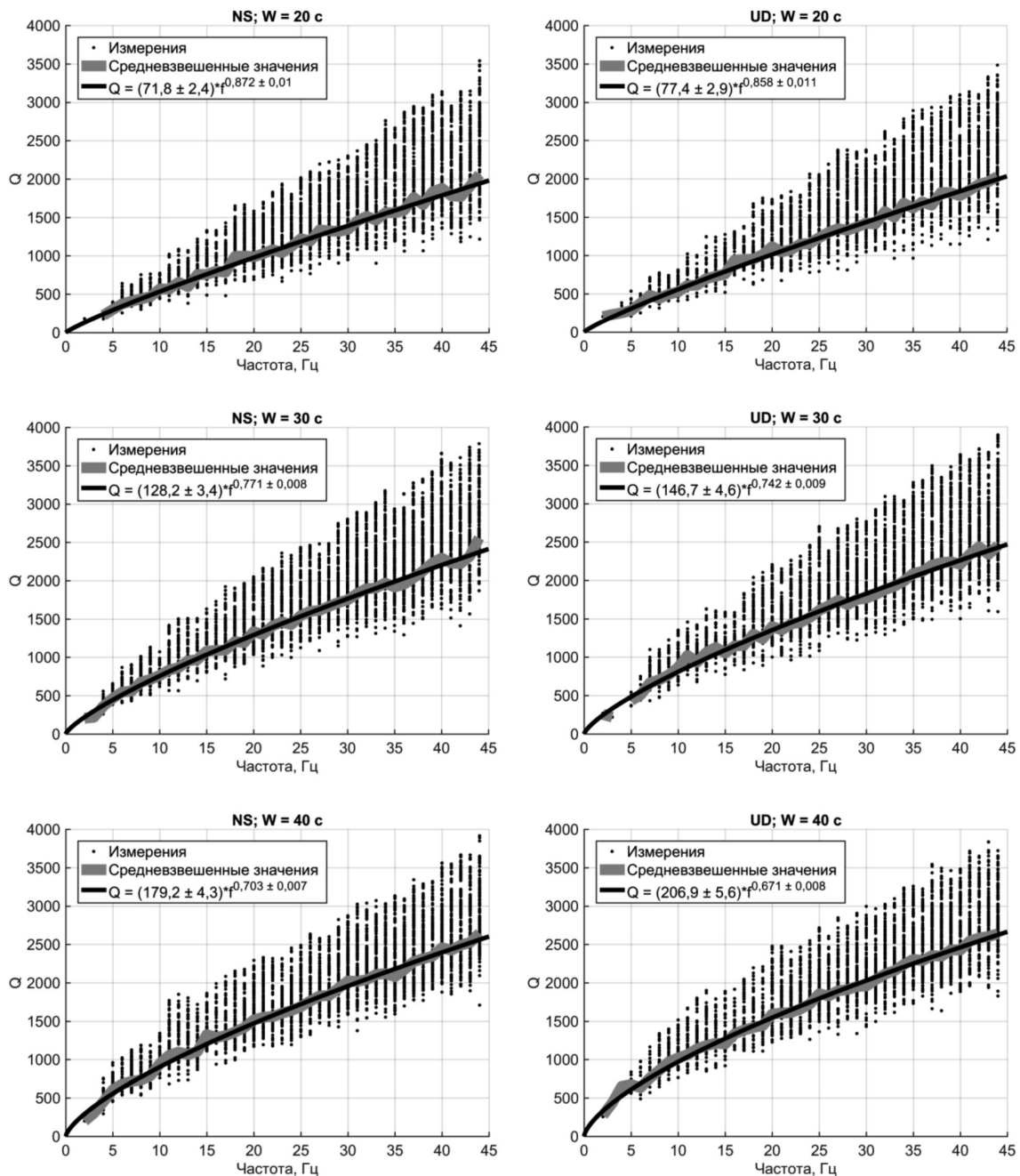


Рис. 3. Зависимость сейсмической добротности Q от частоты для различных длин окна W , для компоненты север-юг (NS, слева) и для вертикальной компоненты (UD, справа)

Анализ расчетов сейсмической добротности Q привел к неожиданному результату – «анизотропии» добротности. Оказалось, что значения добротности и частотного параметра отличаются для разных компонент, и их отличие существенно превышает ошибку с 95%-ной вероятностью (таблица и рис. 3). Эти различия особенно велики между вертикальной и горизонтальными компонентами, однако они отмечают-

ся и между значениями добротности горизонтальных компонент.

Следует отметить аналогию между выявленной «анизотропией» сейсмической добротности и обнаруженным ранее смещением резонансных частот на разных компонентах сейсмических записей на одной и той же станции [3, 4]. Например, на станции «Чеугда» (CHGD) основной резонанс и сейсмических колебаний, и микросейсми-

ческого шума располагается на вертикальной компоненте на частотах 13–21 Гц, на северной компоненте – 11–14 Гц, на восточной компоненте – 10–13 Гц [4].

Оба описанных эффекта могут быть следствием структурирования геологической среды в результате постоянных вибрационных воздействий агрегатов ГЭС.

Выводы

Получены характеристики затухания сейсмических волн (добротность Q и частотный параметр n) в литосфере Бурейского массива (район Бурейской ГЭС). Рассчитанные по данным кода-волн от локальных землетрясений значения добротности соответствуют стандартной модели и с высокой точностью аппроксимируются степенной функцией $Q = (77 \pm 3) \cdot f^{0,858 \pm 0,011}$.

Сравнительный анализ полученных результатов с данными для других регионов показал, что такие низкие значения добротности характерны для тектонически активных регионов и указывают на высокий сейсмический потенциал исследуемой территории Бурейского массива.

Обнаружена существенная зависимость затухания сейсмических волн от направления колебаний – «анизотропия» добротности. Наибольшее различие добротности фиксируется между вертикальной и горизонтальными компонентами.

Полученные значения сейсмической добротности могут быть использованы при оценке сейсмической опасности, при уточнении скоростной модели среды, при расчёте очаговых параметров землетрясений и т.д.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН и при частичном финансировании РФФИ (грант 16-05-00097). Авторы благодарны Филиалу ПАО «РусГидро» – «Бурейская ГЭС» и лично М.Е. Харитонову за предоставленные сейсмические данные.

Список литературы / References

1. Спивак А.А., Кишкина С.В. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. 2004. № 7. С. 35–49.
- Spivak A.A., Kishkina S.B. The use of microseismic background for the identification of active geotectonic structures and determination of geodynamic characteristics // Fizika Zemli. 2004. № 7. P. 35–49 (in Russian).
2. Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. № 10. С. 49–68.
- Mirzoev K.M., Nikolaev A.V., Lukk A.A., Yunga S.L. Induced seismicity and the possibilities of controlled relaxation of tectonic stresses in the Earth's crust // Fizika Zemli. 2009. № 10. P. 49–68 (in Russian).
3. Трофименко С.В., Рябинкин К.С., Пупатенко В.В., Колотова Л.Г., Харитонов М.Е. Динамика геосреды по спектральной плотности мощности микросейсм до и после землетрясений // Тихоокеанская геология. 2017. № 5. С. 20–28.
- Trofimenko S.V., Ryabinkin K.S., Pupatenko V.V., Kolotova L.G., Haritonov M.E. Dynamics of Geophysical Medium from Power Spectral Density of Microseisms before and after Earthquakes: Case Study of Bureya Massif, Amur Region // Tikhookeanskaja Geologija. 2017. № 5. P. 20–28 (in Russian).
4. Рябинкин К.С., Пупатенко В.В. Влияние блоковой структуры среды на распространение сейсмических волн // Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием. Секции 1–5. Нерюнгри: Изд-во Технического института (ф) СВФУ, 2018. С. 180–184.
- Ryabinkin K.S., Pupatenko V.V. Influence of the block structure of the medium on the propagation of seismic waves // Materialy XIX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchyonykh, aspirantov i studentov v g. Neryungri, s mezhdunarodnym uchastiem. Sectsii 1–5. Neryungri: Izd-vo Tekhnicheskogo instituta (f) SVFU, 2018. P. 180–184 (in Russian).
5. Aki K., Chouet B. Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects // Journal of Geophysical Research. 1975. no. 80. P. 3322–3342.
6. Забродин В.Ю., Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2015. 132 с.
- Zabrodin V.Yu., Rybas O.V., Gil'manova G.Z. Fault Tectonics of the Russian Far East Mainland. Vladivostok: Dal'nauka, 2015. 132 p. (in Russian).
7. Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 2011. № 5. С. 712–724.
- Dobrynina A.A., Chechel'nitskii V.V., San'kov V.A. Seismic quality factor of the lithosphere of the southwestern flank of the Baikal rift system // Geologiya i geofizika. 2011. № 5. P. 712–724 (in Russian).
8. Sharma B., Gupta A. K., Devi D. K., Kumar D., Teotia S.S., Rastogi B. K. Attenuation of High-Frequency Seismic Waves in Kachchh Region, Gujarat, India. Bulletin of the Seismological Society of America. 2008. vol. 98. no 5. P. 2325–2340.