

*В. В. Арапов<sup>1\*</sup>, А. А. Еманов<sup>1,2</sup>, А. Ю. Рыбушкин<sup>1</sup>*

## **Оценка внутреннего поглощения и рассеяния упругих волн, их вклад в общее затухание для территории Горного Алтая**

<sup>1</sup> Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: arapovviktor90@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе оценивается внутреннее поглощение и рассеяние упругих волн, и их вклад в общее затухание для крупных тектонических структур земной коры в Горном Алтае. В анализе использовались записи сильных землетрясений с магнитудой  $M_l > 2.5$ , зарегистрированные сетью стационарных и временных станций АСФ ФИЦ ЕГС РАН. Для оценки вклада поглощения  $Q_i^{-1}$  и рассеяния  $Q_{sc}^{-1}$  в общее затухание  $Q_T^{-1}$  использовался метод Веннерберга. Этот метод позволил определить общее затухание для Северо-Чуйского, Южно-Чуйского, Айгулакского хребтов, Чуйской и Курайской котловин.

**Ключевые слова:** добротность, метод Веннерберга, Алтае-Саянская складчатая область, землетрясение

*V. V. Arapov<sup>1\*</sup>, A. A. Emanov<sup>1,2</sup>, A. Yu. Rybushkin<sup>1</sup>*

## **Assessment of the internal absorption and scattering of elastic waves, their contribution to the overall attenuation for the territory of the Altai Mountains**

<sup>1</sup> Altay-Sayan Branch of the United Geophysical Survey RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: arapovviktor90@gmail.com

**Abstract.** In this paper, the internal absorption and scattering of elastic waves and their contribution to the overall attenuation for large tectonic structures of the Earth's crust in the Altai Mountains are estimated. The analysis used records of strong earthquakes with a magnitude of  $M_l > 2.5$ , recorded by a network of stationary and temporary stations of the ASGSR. The Wengerberg method was used to estimate the contribution of  $Q_i^{-1}$  absorption and  $Q_{sc}^{-1}$  scattering to the total attenuation of  $Q_T^{-1}$ . This method allowed us to determine the total attenuation for the North Chui, South Chui, Aigulak ranges, Chui and Kurai basins.

**Keywords:** Q-factor, Wengerberg method, Altai-Sayan folded region, earthquake

### ***Введение***

Алтае-Саянская складчатая область – один из наиболее сейсмически активных регионов России. Изучение региона Горного Алтая представляет большой интерес для сейсмологического сообщества в связи с его сложным тектониче-

ским строением. Наличие большого количества стационарных станций и разветвленной временной сети, а также высокий уровень сейсмической активности, создают условия для изучения особенностей строения среды, выявления зон тектонических неоднородностей. Регистрация Чуйского (27.09.2003) и Айгулакского (13.09.2019) землетрясений и их афтершоков большим количеством станций позволяет выполнить оценку параметра добротности и ее составляющих для принципиально отличающихся в тектоническом плане структур региона (Северо-Чуйского, Южно-Чуйского, Айгулакского хребтов и Чуйской и Курайской котловин).

Для точного описания распространения волн важна не только скорость распространения упругой волны, но и ее затухание. Помимо геометрического расхождения, следует различать два различных механизма. Первый – внутреннее поглощение, объясняющее преобразование сейсмической энергии в различные виды энергии (например, тепло), второй – рассеивающее затухание, описывающее потерю энергии на неоднородностях среды. Метод Веннерберга [9] позволяет оценить вклад поглощения  $Q_i^{-1}$  и рассеяния  $Q_{sc}^{-1}$  в общее затухание  $Q_T^{-1}$ . Используемый в данной работе метод инверсии огибающей коды [10] заключается в минимизации невязки между функциями Грина наблюдаемой и рассчитываемой огибающей плотности энергии в определенном диапазоне частот, реализованный в программном пакете Qopen [11].

Анализ компонент затухания, полученных в ходе исследования, позволит оценить вклад компонент рассеяния и поглощения в общее затухание, что в свою очередь позволит выявить зоны повышенной тектонической неоднородности. Точное определение параметра добротности позволит выполнять расчет не только локальной магнитуды  $M_L$ , но и моментной магнитуды  $M_w$ . Согласно исследованиям Сато [13], моментная магнитуда в большей степени связана с энергией землетрясения, чем другие шкалы, и не занижает величины, как это делают другие шкалы в определенных условиях.

### ***Район исследования***

На территории Горного Алтая ежегодно регистрируются тысячи землетрясений разной интенсивности. Высокий уровень сейсмичности данной территории обусловлен высокой степенью тектонической неоднородности. Чуйско-Курайская зона представляет особый интерес. Системы горных хребтов (Чуйский, Курайский, Айгулакский) разбиты множеством разломов и имеют схожие деформационные характеристики, тогда как впадины (Курайская, Чуйская) являются более монолитными участками и отличаются от горных хребтов (рис. 1). Такие монолитные участки внутри горной системы должны оказывать сопротивление ее движению при внешних воздействиях. Сопоставление карты эпицентров с рельефом местности и активными разломами дает информацию о том, что все сейсмоактивные зоны Алтае-Саянской области увязываются с системами впадин, а отмеченные крупные впадины представляют собой блоки вокруг которых происходят крупные землетрясения [3, 4].

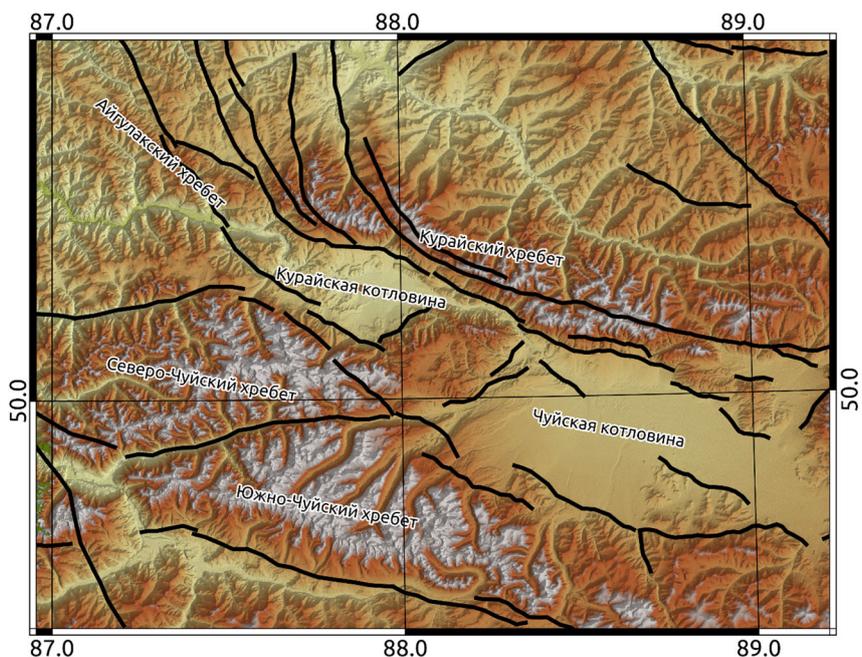


Рис. 1. Карта тектонических разломов Горного Алтая [8]

### *Исходные данные*

Для выполнения расчетов и последующего анализа были использованы записи волновых форм землетрясений, зарегистрированных в пределах территории горного Алтая. Регистрация производилась как станциями стационарной сети, так и временной. Станции CUR, AKAR, TUNR, CHBI, ULGR, DGZ, SLNR – стационарной сети и CB19, TYTO, M23, CC02, CC03, CC04, CC08, CH01, CH04, CH06, CH07, CE01, CHP02, RKUR – временной сети обеспечили достаточный уровень покрытия для каждой из исследуемых структур. На каждой из исследуемых структур в период с 2017.01.01 по 2023.01.01 было зарегистрировано большое количество событий [5, 6, 7], из которых выбирались события с магнитудой  $M_L$  более 2.5. В результате к анализу было принято 237 землетрясения (табл. 1, рис. 2)

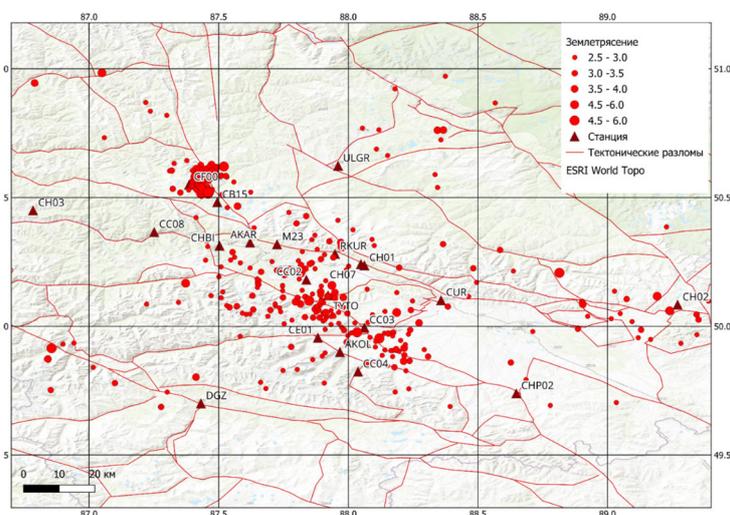


Рис. 2. Карта анализируемых землетрясений

Количество принятых к расчёту событий для каждой структуры

Структура	Кол-во событий	Кол-во станций
Айгулакский хребет	65	12
Курайская котловина	50	8
Чуйская впадина	15	9
Северо-Чуйский хребет	64	11
Южно-Чуйский хребет	43	9

### Методика исследования

В методе Веннерберга рассеяние и собственное затухание определяются коэффициентом транспортного рассеяния  $g$  и коэффициентом поглощения  $b$ . Поглощение и рассеяние вычисляются формулами:

$$Q_{sc}^{-1} = \frac{g^* v_0}{2\pi f} \quad Q_i^{-1} = \frac{b}{2\pi f}, \quad (1)$$

где  $f$  – центральная частота фильтрации,  $v_0$  – средняя скорость упругих волн в среде.

Общее затухание  $Q_{tot}^{-1}$  рассчитывается суммированием вклада поглощения и рассеяния (2). Определение доли рассеяние на неоднородностях среды, называемое сейсмическим альбедо описывается формулой (3):

$$Q_{tot}^{-1} = Q_{sc}^{-1} + Q_i^{-1} \quad (2)$$

$$B = Q_{sc}^{-1} / Q_{tot}^{-1} \quad (3)$$

Рассеивающие свойства среды для поперечных волн могут быть определены путем анализа прямой S-волны и ее коды. Влиянием волн сжатия в S-коде можно пренебречь из-за высокого коэффициента преобразования P-в-S. Собственное затухание сдвиговых волн и затухание при рассеянии отличаются их различным воздействием на энергетическую оболочку. В то время как рассеяние влияет на форму огибающей в пространстве и во времени – в первую очередь на уровень энергии между прямой S-волной и рассеянной coda-волной – внутреннее затухание может быть объяснено экспоненциальным уменьшением огибающей со временем.

### Результаты

Вычисление параметра добротности  $Q_{tot}$  для центральных частот в 1.5, 3, 6, 12, 24 Гц (рис. 3) показало заметный рост значения с увеличением частоты. При этом наибольшие значения имеет Чуйская впадина как наиболее стабильная

структура региона. Сопоставляя характеристику затухания разных регионов Мак [12] сделал вывод о том, что значения  $Q < 200$  тектонически активным районом,  $Q 200-600$  промежуточным, а  $Q > 600$  стабильным.

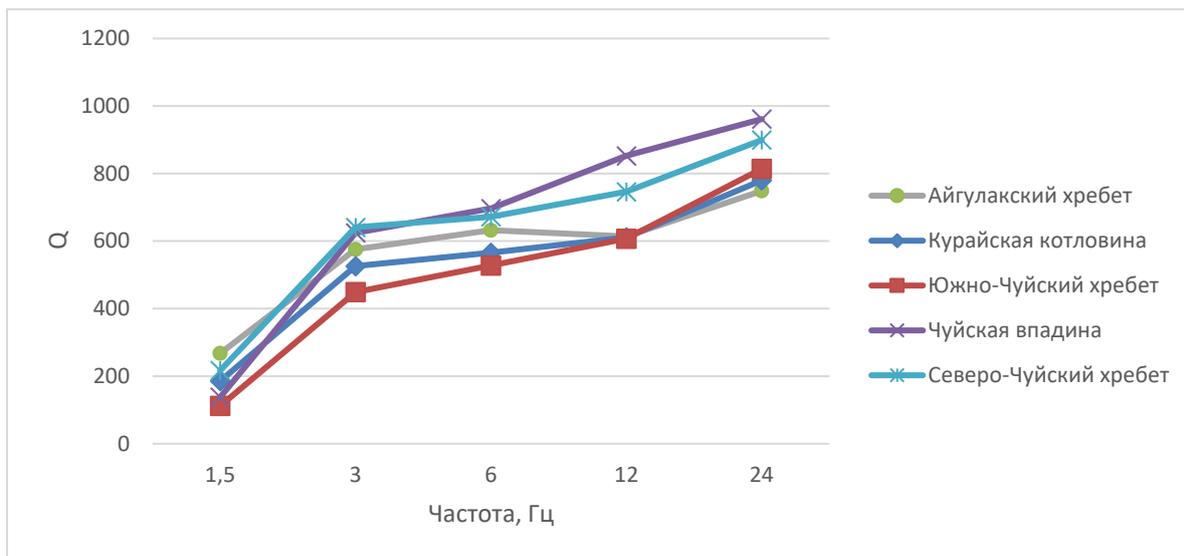


Рис. 3.  $Q_{tot}$  для основных структур Горного Алтая

Сейсмическое альbedo показывает вклад рассеяния в общее затухание, тем самым характеризуя неоднородность среды. На рис. 4 видно, что Айгулакский хребет имеет наибольшую тектоническую неоднородность на высоких частотах, тогда как Чуйская котловина наименьшую. Однако Курайская котловина, несмотря на свою относительную тектоническую однородность имеет достаточно высокие значения альbedo, что в свою очередь обусловлено непрекращающейся сейсмической активностью в юго-восточной части структуры, что безусловно влияет на тектоническую однородность структуры.

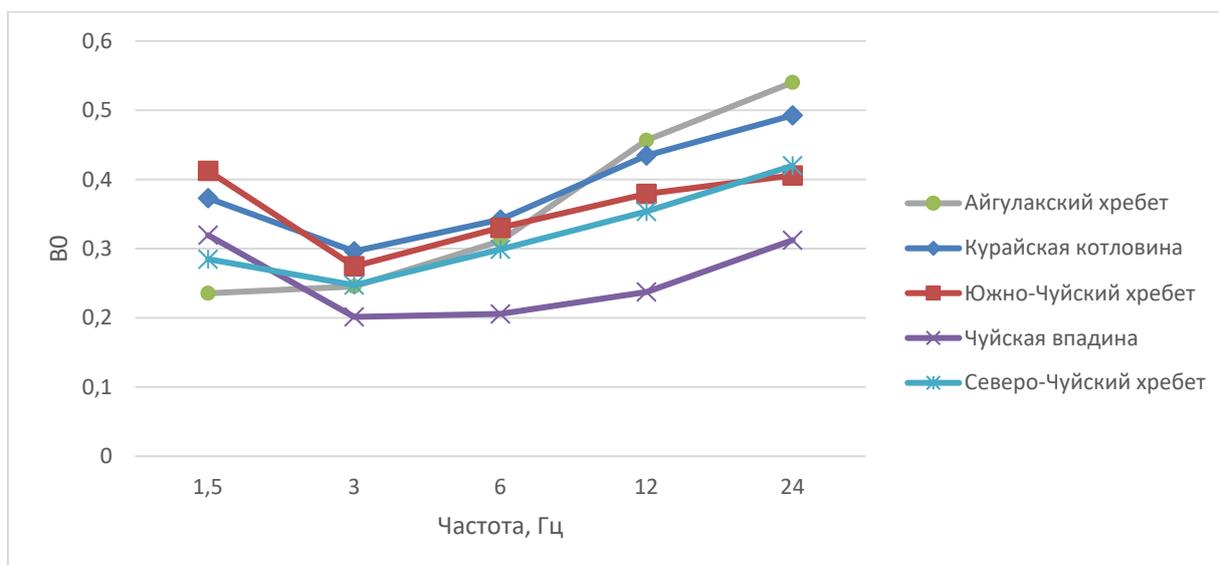


Рис. 4. Альbedo для основных структур Горного Алтая

Вклад поглощения и рассеяния в общее затухание неравномерен. Рассматривая две наиболее показательные структуры – Айгулакский хребет (рис. 5а) и Чуйскую котловину (рис. 5б) можно заметить, что на низких частотах вклад поглощения выше, чем рассеяние. С увеличением частоты соотношение выравнивается.

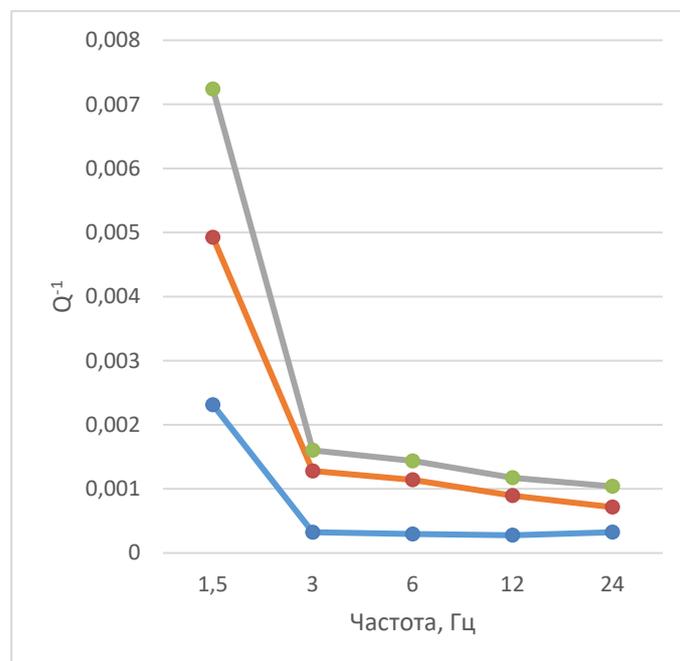
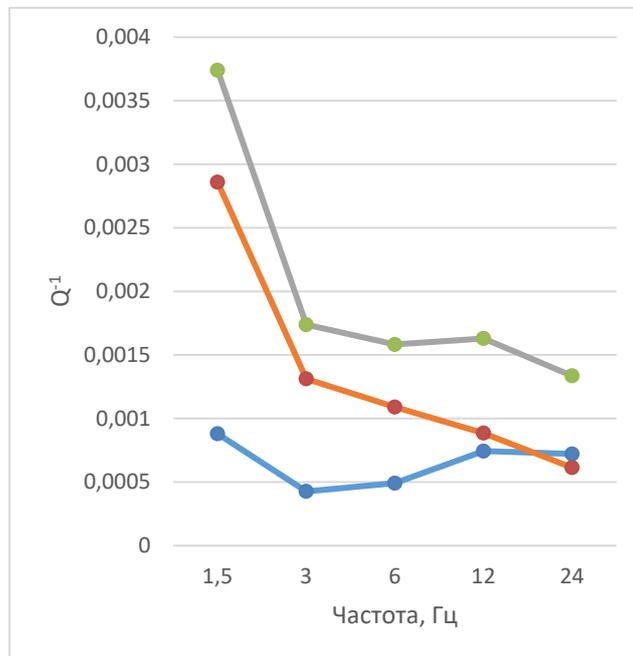


Рис. 5. Вклад поглощения  $Q_i^{-1}$  (Оранжевый) и рассеяния  $Q_{sc}^{-1}$  (Синий) в общее затухание  $Q_T^{-1}$  (Серый) для (а) территории Айгулакского хребта (б) территории Чуйской впадины

Наличие большого количества землетрясений позволяет рассчитать параметр добротности для каждой сейсмической станции путем осреднения полученных значений в пределах 60 км от станции. Полученный результат можно картографировать (рис. 6). Карта более детально отображает пространственное распределение параметра добротности и позволяет выявить зоны повышенных и пониженных значений.

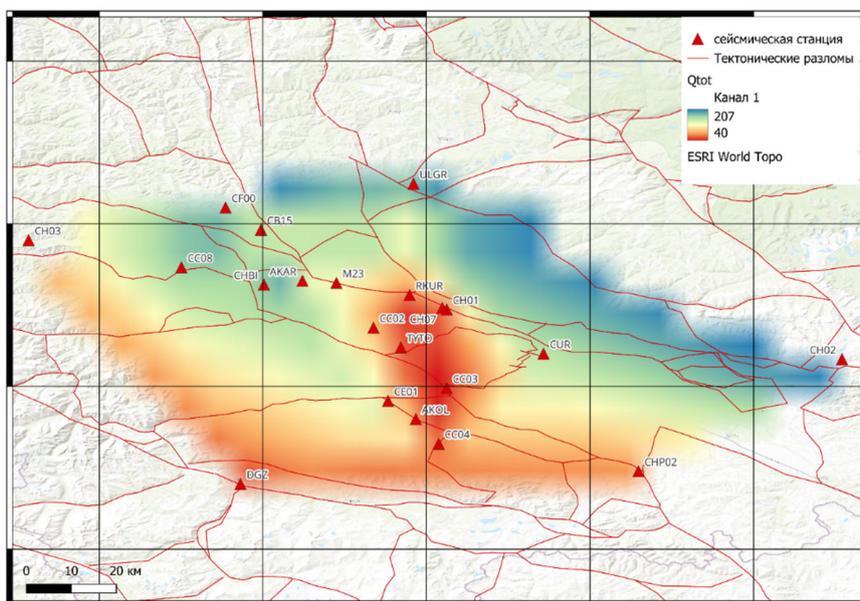


Рис. 6. Карта добротности  $Q_{tot}$  для территории Горного Алтая на частоте 1.5 Гц

### **Обсуждение**

Вычисление параметра добротности с использованием метода Веннерберга позволило получить информацию о неоднородности крупных тектонических структур региона Горный Алтай. Использование большого количества станцийкратно повысило детальность исследований региона. Полученные значения добротности согласуются с результатами ранее выполненных работ [1, 2]. Анализируя карту добротности для частоты 1.5 Гц можно утверждать, что территория Чуйско-Курайской зоны весьма неоднородна. Чуйская котловина, Северо-Чуйский и Айгулакский хребты имеют относительно высокие значения добротности тогда, как восточная часть Курайской котловины и Южно-Чуйский хребет низкие.

### **Заключение**

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о высокой степени тектонической неоднородности изучаемого региона. Отчётливо выделяются структуры с повышенными и пониженными значениями затухания. Определение параметра добротности для каждой из структур позволяет использовать это значение для последующих расчетов моментной магнитуды, гораздо более точно описывающей энергию землетрясения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арапов В. В., Еманов А. А., Юшин В. И., Еманов А. Ф. Площадные исследования добротности земной коры в Алтае-Саянской складчатой области // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2024. – № 1. – С. 10-23.
2. Колесников Ю. И., Еманов А. Ф., Еманов А. А. и др. О частотно-зависимой добротности литосферы Алтае-Саянской складчатой области // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения акад. Н. Н. Пузырева (Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г.). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 166-169.
3. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Филина А. Г. Пространственно-временной анализ сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Проблемы сейсмологии III тысячелетия: матер. Материалы международной конференции (Новосибирск, 15-19 сентября 2003 г.). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 73-86
4. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Филина А. Г., Лесковамм Е. В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 1. – С. 4964.
5. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. и др. Сейсмичность Алтае-Саянского региона в 2018-2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018-2019 гг.). – С. 133-142.
6. Айгулакское землетрясение 13.09.2019 г. с  $M = 4.7$  и его афтершоки в структуре сейсмичности Чуйско-Курайской зоны Горного Алтая / А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, А. В. Фатеев [и др.] // Землетрясения России в 2019 году : Ежегодник. – Обнинск : Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2021. – С. 117-122. – EDN RKPDLR.
7. Эпицентральные зоны Чуйского 2003 г. и Айгулакского 2019 г. землетрясений / А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, А. В. Фатеев [и др.] // Землетрясения России в 2021 году : Ежегодник. – Обнинск : Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2023. – С. 133-137. – EDN GYTNZQ.
8. Zelenin E. A., Bachmanov D. M., Garipova S. T., Trifonov V. G., Kozhurin A. I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14. – P. 4489-4503.
9. Wennerberg L. Multiple-scattering interpretations of coda-Q measurements // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1993. – Vol. 83. – № 1. – P. 279-290.
10. Sens-Schönfelder C., Wegler U. Radiative transfer theory for estimation of the seismic moment // Geophysical Journal International. – 2006. – Vol. 167. – № 3. – P. 1363-1372.
11. Eulenfeld T., Wegler U. Measurement of intrinsic and scattering attenuation of shear waves in two sedimentary basins and comparison to crystalline sites in Germany // Geophysical Journal International. – 2016. – Vol. 205. – № 2. – P. 744-757.
12. Mak S., Chan L. S., Chandler A. M., Koo R. Coda Q estimates in the Hong Kong region // Journal of Asian Earth Sciences. – 2004. – Vol. 24. – P. 127-136.
13. Sato H., Fehler M. C. Seismic Wave Propagation and Scattering in the heterogeneous Earth. – New York : Springer-Verlag, 1998. – 308 p.

© В. В. Арапов, А. А. Еманов, А. Ю. Рыбушкин, 2024