

Е. А. Баталева, К. С. Непейна*

Выбор критериев оценки сейсмической активности разломных зон на основе геоэлектрических построений (Северный Тянь-Шань)

Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизская Республика

* e-mail: bataleva@gdirc.ru

Аннотация. В работе представлена практическая реализация оценки «сейсмического» критерия активности современного геодинамического состояния крупного разлома (~160 км). В качестве апробации рассматривается взбросо-надвиговый активный разлом в Чуйской впадине Северного Тянь-Шаня. Для определения ширины зоны динамического влияния (ЗДВ) разлома используются геоэлектрические модели. Данные модели построены по серии профилей, секущих разломные структуры, которые проявляются в моделях как зоны пониженного сопротивления, и эмпирические формулы, отражающие корреляционные связи между шириной ЗДВ и длиной самого разлома. Для оценки статистических параметров прямолинейных сегментов разлома и подсчета, попадающих в эти зоны гипоцентров землетрясений, использован пакет встроенных решений «анализ данных VBA» MS Excel и каталог землетрясений сети KNET за 2020 г. Определена ширина зоны динамического влияния разлома для глубин до 5 км, где она оценивается ~3-5 км. Выполнены расчеты пространственного положения эпицентров землетрясений по отношению к центральной линии сместителя и крыльям разлома.

Ключевые слова: сейсмоактивный разлом, зона динамического влияния разлома, каталог землетрясений, геоэлектрический разрез, Северный Тянь-Шань

Е. А. Bataleva, К. S. Nepeina*

Selection of evaluation criteria of the fault zones seismic activity based on geoelectric constraints (Northern Tien Shan)

Research Station RAS, Bishkek, Kyrgyz Republic

* e-mail: bataleva@gdirc.ru

Abstract. The paper presents a practical implementation of the evaluation of the "seismic" activity criterion of the current geodynamic state of a large fault (~160 km). As an approbation, a reverse-thrust active fault in the Chui basin of the Northern Tien Shan is considered. To determine the width of the dynamic influence zone (DIZ) of the fault, geoelectric models are used. These models are built on the base of a series of profiles that cut fault structures, which appear in the models as zones of reduced resistance, and empirical formulas that reflect the correlation between the width of the DIZ and the length of the fault itself. To estimate the statistical parameters of straight segments of the fault and to calculate the earthquake hypocenters falling into these zones, the MS Excel package of built-in solutions "VBA data analysis" and the KNET earthquake catalog for 2020 were used. The width of dynamic influence zone of the fault for depths up to 5 km was determined, where it is estimated at ~3-5 km. Calculations of the spatial position of the earthquake epicenters with respect to the central line of the fault plane and the fault "wings" have been performed.

Keywords: seismically active fault, zone of fault dynamic influence, earthquake catalog, geoelectric section, Northern Tien Shan

Введение

Изучение новейшей геодинамики активных разломов современными методами, особенно в объемном представлении – одно из актуальных направлений геолого-геофизических исследований в сейсмически активных регионах. Именно поэтому данные магнитотеллурических зондирований (МТЗ), которые позволяют получить интегральную характеристику среды (т.е. и в объеме, и по глубине), являются наиболее востребованными в данном случае. В начале прошлого века Г. Рейд [1], в своей широко известной работе, впервые высказал гипотезу о приуроченности землетрясений к разломным структурам земной коры, что привлекло внимание ученых-геофизиков к более детальному исследованию закономерностей локализации сейсмических событий в зонах разломов.

Одним из наиболее интересных вопросов нам представляется характер расположения гипоцентров землетрясений, которые могут быть приурочены не только к субвертикальной линии залегания разломов, но и к листрическим границам в зоне выполаживания разломов. В итоге, может быть получена такая картина распределения гипоцентров, где противоположные крылья разлома по-разному реагируют на процессы, происходящие в земной коре. Интерес к оценке сейсмической активности каждого из крыльев разлома также обусловлен и различным характером распределения аномалий на геоэлектрических моделях, которые отражают глубинное распределение электромагнитных параметров. Точные цифровые данные о численном распределении очагов землетрясений по разным бортам от сместителя с привлечением скоростей GPS перемещения блоков в разных областях разлома (его сегментов) представляют особый интерес для заключений в отношении современной тектонической активности.

Целью настоящего исследования является поиск унифицированного подхода с выработкой методики пересчета глубин гипоцентров землетрясений в автоматизированном порядке для оценки местоположения гипоцентров землетрясений. Данное исследование необходимо для формирования единого подхода в оценке зоны динамического влияния (ЗДВ) разлома путем количественной оценки числа землетрясений отдельно на левом и правом крыльях разлома. Для корректной оценки ширины ЗДВ используются геоэлектрические модели, полученные на основе интерпретации данных магнитотеллурических зондирований, выполненных в Чуйской впадине [2-4].

Для достижения поставленной цели в первую очередь необходимо провести расчеты относительного пространственного положения эпицентров землетрясений по отношению к центральной линии сместителя разлома (численно оценить активность как количество эпицентров). Объектом исследования выбрана зона Исык-Атинского разлома (рис.1), представляющего собой активный надвиг южного обрамления Чуйской впадины Северного Тянь-Шаня и контролирующего зону сочленения Киргизского хребта с впадиной в обстановке сжатия и находящегося вблизи густонаселенного города Бишкек [5-7]. Визуализация результатов, полученная в ходе работы алгоритма, поможет облегчить аналитику получаемых данных из сейсмических каталогов.

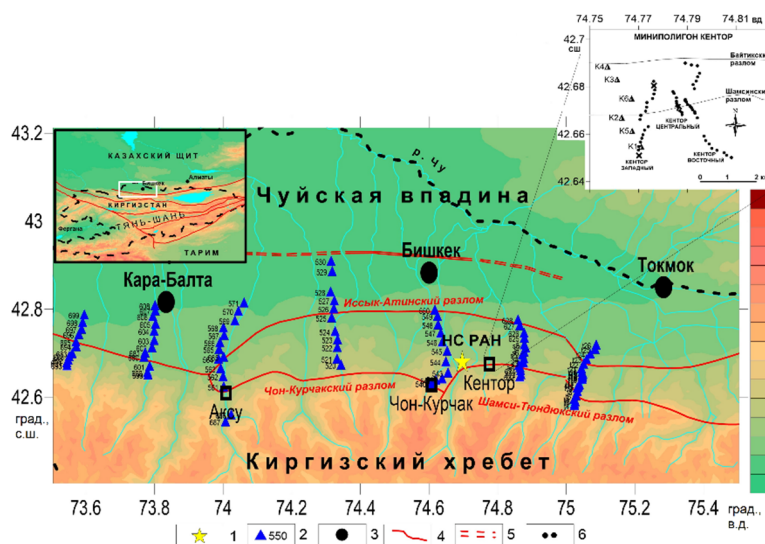


Рис. 1. Положение активных разломных структур Чуйской впадины: 1- местоположение Научной станции РАН в г. Бишкеке; 2 – пункты магнитотеллурического зондирования; 3 – населенные пункты; 4 – основные активные разломы; 5 – Чуйская флексурно-разрывная зона; 6 – государственная граница Киргизской Республики. На врезке в левом верхнем углу светлым прямоугольным контуром показано положение Бишкекского геодинамического полигона. На врезке в правом верхнем углу – миниполигон Кентор

Методы и материалы

Для тестирования методики, в качестве примера, выбран каталог землетрясений, зарегистрированных сетью KNET на территории Республики Кыргызстан за 2020 г. Исходные данные содержатся в таблице параметров землетрясений (из таблицы берутся координаты землетрясений и глубина очага, где (X_0, Y_0) – географические координаты землетрясения в градусах (в.д., с.ш.)). Особое внимание обращается на характерную черту локализации большинства сильных землетрясений: приуроченность их эпицентров к участкам кулисного сочленения крупных разломных сегментов, и различиях в поведении противоположных крыльев разлома, превалировании более глубокофокусных очагов в зоне Предкиргизского прогиба, что возможно связано с листрической формой искривления линии сместителя в связи с деформацией надвигового типа, и свидетельствует о повышенной сейсмической опасности активных разломов.

Иссык-Атинский разлом является субширотным, взбросо-надвигового типа, он четко выражен в рельефе [7]. Координаты выявленного тектонического нарушения на поверхности получены в результате комплексной методики с учетом геоморфологии с использованием цифровых замеров с помощью GPS, проведенной сотрудниками Научной станции РАН в г. Бишкеке и опубликованы в работах [8, 9]. Для разломной зоны были выполнены детальные морфоструктурные исследования на территории общей протяженностью 160 км с заданными координатами в диапазоне от 74.473615 градусов до 75.729894 градусов по долготе и от 42.815776 градусов до 42.773912 градусов по широте. Результаты исследований

по 86 узлам разломной структуры приведены в таблице данных, опубликованных в работах [8, 9]. Иссык-Атинский разлом сегментарно проявляется на поверхности земли и уходит вглубь на 20 и более километров [7, 10]. В работе [7] разломная зона была сегментирована на две части, при этом установлено, что каждый из сегментов способен породить землетрясение с магнитудой, равной 7.1-7.3. При более детальных геолого-геофизических исследованиях на протяжении тектонического нарушения было выделено 6 сегментов с различными геолого-геоморфологическими признаками, причем три из них не проявляются на дневной поверхности и являются скрытыми.

Представление о блоковом строении этой разломной зоны получено совместным анализом 2D геоэлектрических моделей, построенных с использованием данных магнитотеллурического зондирования по серии профилей, секущих зону Иссык-Атинского разлома [11, 12]. Пример одной из таких моделей приведен на рисунке 2, где разломная структура находится вблизи дневной поверхности между пунктами зондирования 8 и 9. Детальная схема расположения разломных структур и пунктов МТЗ в зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины с указанием геохронологического возраста показана в работе [12], а результаты геоэлектрического моделирования - в работах [11,12]. Геоэлектрический разрез характеризуется контрастным распределением областей различного электрического сопротивления, где выделяется зона пониженного сопротивления (от 1-5 до 200 Ом·м), ассоциируемый с областью динамического влияния активного разлома [13, 14].

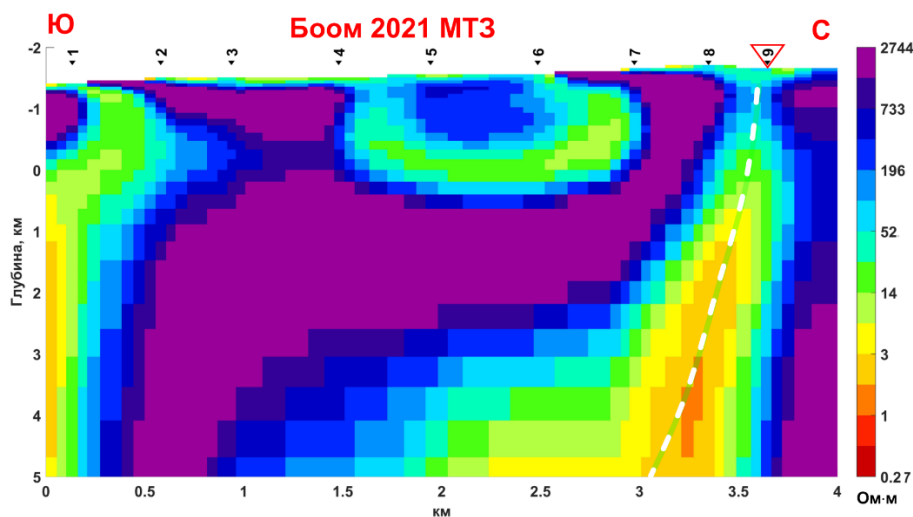


Рис. 2. Геоэлектрическая модель для восточной части Иссык-Атинского разлома (пунктирная линия). Вверху треугольниками обозначены пункты МТЗ.

Исходя из визуального анализа полученных геоэлектрических моделей [11], ширина ЗДВ для Иссык-Атинского разлома была определена по границам высокоомных и низкоомных зон. Таким образом, при сопоставлении геоэлектрических моделей для 6 профилей (рис. 1) можно сделать вывод, что ЗДВ прослежи-

вается по глубине до 3-5 км. Для 3 профиля между 527 и 526 пунктами = 2.8 км, 5 профиля = 2 км, 6 профиля = 4 км. Следовательно, ЗДВ разлома проявляется как зона повышенной проницаемости, которые характеризуются значениями низкого кажущегося электрического сопротивления, и ее ширина в среднем составила около 3 км (для глубины до 5 км). Это свойство разломов с повышенной проницаемостью исходит из определения активных разломов по косвенным геологическим признакам [15] и подтверждается работами К.Ж. Семинского [16]. Под пунктами зондирования 1 и 2 также проявляется разломная структура, но в рамках данного исследования она нами не рассматривается.

Согласно С.И. Шерману [17], «сейсмологическим» критерием для ЗДВ разлома является сосредоточение основной части землетрясений, приуроченных к рассматриваемой разломной зоне. Многие авторы сходятся во мнении о существовании корреляционных связей между длиной разлома L , шириной разломной зоны W и амплитудой смещения по разрыву D [17-21]. Основываясь на [20], для связи между этими параметрами чаще всего используют степенные соотношения типа:

$$M_1 = b \times L, \quad (1)$$

$$W = \alpha \cdot D^a, \quad (2)$$

$$D = \beta \cdot L^b, \quad (3)$$

где M_1 – ширина зоны динамического влияния разлома, L – длина разлома, км; b – коэффициент пропорциональности, зависящий от L и по эмпирическим данным и изменяющийся от 0.03 до 0.09 соответственно для трансрегиональных и локальных разломов; α - параметр степени катаклаза $\sim 0.016 \div 0.48$ тем выше, чем тонкодисперснее частицы; β изменяется от 0.01 до 0.08 при вероятном значении $\beta=0.03$, показатель степени a чаще всего близок к 1 [20]. Ширина ЗДВ M_1 по формуле (1) была оценена в 4.8 км, исходя из $L=160$ км, $b=0.03$, что, в целом, согласуется по размерам с зонами повышенной проводимости в верхней части разреза, определенной по МТЗ (~ 3 км). Ширина разломной зоны в этом случае $W=700$ мм, амплитуда смещения по разлому $D=35$ м. Далее M_1 была переведена из километров в градусы (5) и определены граничные условия следующим образом (6) и (7):

$$M = (M_1/30708) \times 360, \quad (5)$$

$$x_1 = x + M/2 ; x_2 = x - M/2 \quad \text{для долготы}, \quad (6)$$

$$y_1 = y + M/2 ; y_2 = y - M/2 \quad \text{для широты}. \quad (7)$$

Для удобства подсчета разлом был поделен на 5 условно прямолинейных сегментов (узлы 1-14, 15-18, 19-24, 25-29, 30-86) (рис. 3).

После был применен пакет вычислений в программе объектно-ориентированного программирования на языке VBA в MS Excel с использованием надстроек add-in – формул с использованием встроенных функций (рис. 4) [22].

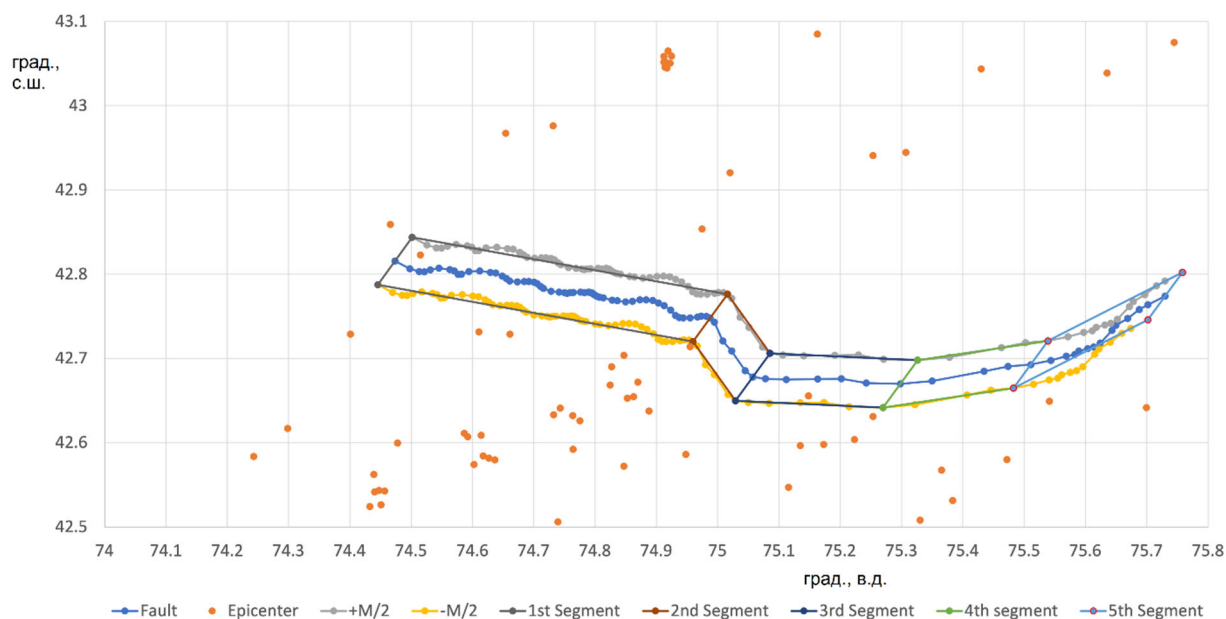


Рис. 3. Сегменты Исык-Атинского разлома и ЗДВ (результат расчета по координатам на поверхности) и эпицентров землетрясений (оранжевые точки) для глубины ~5 км. Центральная синяя линия – сместитель разлома по GPS.

Column1		Column2	
Mean	74.74744	Mean	42.78091
Standard Error	0.018327	Standard Error	0.002406
Median	74.75896	Median	42.77847
Mode	#N/A	Mode	#N/A
Standard Deviation	0.138367	Standard Deviation	0.018164
Sample Variance	0.019145	Sample Variance	0.00033
Kurtosis	-0.90368	Kurtosis	-0.82073
Skewness	-0.152246	Skewness	-0.151397
Range	0.507945	Range	0.067635
Minimum	74.47362	Minimum	42.74814
Maximum	74.98156	Maximum	42.81578
Sum	4260.604	Sum	2438.512
Count	57	Count	57
Largest(1)	74.98156	Largest(1)	42.81578
Smallest(1)	74.47362	Smallest(1)	42.74814

Рис. 4. Произвольный пример результатов описательной статистики с использованием надстроек add-in пакетных решений «анализ данных VBA» координат первого сегмента (30-86 узлы). Column 1 – по оси X, Column 2 – по оси Y

На следующей стадии производится сравнение и подсчет числа гипоцентров землетрясений, попадающих в заданные границы сегментов, основываясь на значениях максимума и минимума по X и Y из описательной характеристики, с помощью функции «СЧЕТЕСЛИМНОЖ» [22]. Таким образом, было подсчитано количество гипоцентров, равное 3. Полученные данные являются показателем наличия сейсмической активности в зоне динамического влияния Исык-Атинского разлома только на его южном обрамлении.

Заключение

В результате проведенных исследований выполнена численная оценка некоторых параметров активного разлома и его зоны динамического влияния. Применен инструмент - встроенные функции описательной статистики Excel и дополнительный пакет решений «анализ данных VBA». Определена зона динамического влияния объекта исследования – Иссык-Атинского разлома, поделенного на линейные участки - 5 сегментов, для верхней части разреза в пределах ± 2.5 км. Представлена графическая презентация линии сместителя разлома, ЗДВ и гипоцентров землетрясений. Следует отметить, что ЗДВ у такого крупного разлома (длиной 160 км) может быть существенно шире. Однако об этом можно судить только после оценки зон трещиноватости (низкоомных аномалий) на глубинных моделях (до 20 км), что требует дальнейшего исследования. На данном этапе работ магнитуда землетрясений не учитывалась, поскольку рассматривались сейсмические события лишь за один год и в целом за 2020 год область Северного Тянь-Шаня характеризуется невысокими магнитудами порядка 3-4.

Благодарности

Исследование выполняется по темам государственного задания НС РАН № ЕГИСУ НИОКТР АААА-А20-120102190009-9 и № Минобрнауки России 1021052806445-4-1.5.1 и 1021052806454-2-1.5.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reid H.F. Mechanics of the earthquake, the California Earthquake of April 18, 1906 / Report of the State Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington.–Washington DC. – 1910.
2. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // Геофизические исследования. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 54-63.
3. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 1. – С. 93-107. – <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0339>.
4. Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 31-40.
5. Лемзин И.Н. Разломы кыргызской части Тянь-Шаня. – Бишкек: Илим, 2005. – 60 с.
6. Абдрахматов К.Е., Томпсон С., Уелдон Р., Дельво Д., Клеркс Ж. Активные разломы Тянь-Шаня // Наука и новые технологии. – 2001. – № 2. – С. 22–28.
7. Абдрахматов К.Е., Джумабаева А.Б. Сегментация Иссык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Вестник Института Сейсмологии Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. – 2014. – № 1 (3). – С. 24–30.
8. Пржиялговский Е.С., Кузиков С.И. Детальные морфоструктурные исследования в районе Бишкекского геодинамического полигона / Е.С. Пржиялговский (ред.). Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тез. докладов. Бишкек: Изд-во ДЭМИ, 2014. С. 36–38.
9. Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И. Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 6. – С. 1225–1250.
10. Шукурова Ы., Фролова А.Г. К вопросу классификации активных разломов по уровню сейсмичности // Вестник Института Сейсмологии Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. – 2014. – № 1(3). – С. 137-147.

11. Рыбин А.К. Глубинные электромагнитные зондирования в центральной части Киргизского Тянь-Шаня. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: Научный мир, 2001. – 152 с.
12. Баталева Е.А., Матюков В.Е. Глубинное строение восточной части Иссык-Атинского разлома (Северный Тянь-Шань) // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022: Материалы LIII Тектонического совещания, Москва, 01–05 февраля 2022 года. Т. 1. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство ГЕОС", 2022. – С. 44-49.
13. Баталева Е.А. Результаты мониторинга зон динамического влияния разломных структур Северного Тянь-Шаня // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 332-339. – <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-2-332-339>.
14. Баталева Е.А. Глубинная геоэлектрическая структура разломных зон Северного Тянь-Шаня // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ : тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. / ФГБУН ИЗК СО РАН; ФГБОУ ВО «ИГУ» ; отв. ред. К. Ж. Семинский. – Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. – <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1919-0.2021.1-233>. – С. 62.
15. Никонов А.А. Активные разломы: определение и проблемы выделения // Геоэкология. – 1995. – № 4. – С. 16-27. – URL: http://neotec.ginras.ru/comrus/_nikonov-a-a-1995-aktivnyye-razlomy-opredelenie-i-problemy-vydeleniya.pdf.
16. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон / Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео». – 2003. – 293 с.
17. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. – Новосибирск: Наука, 1977. – 103 с.
18. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. – Новосибирск: Наука, 1983. – 112 с.
19. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А. Сейсмический портрет разломной зоны. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений? // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1. – № 4. – С. 414-440.
20. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов / Российская академия наук; Институт динамики геосфер; Российский научный фонд. – М.: ГЕОС, 2016, 424 с.
21. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. – Новосибирск: Гео. – 2014. – 359 с.
22. Бурнаева Э.Г., Леора С.Н. Статистический пакет анализа данных в Excel 2013 / Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ, 2020. – 40 с.

© Е. А. Баталева, К. С. Непеина, 2023