



УДК 550.34.094+550.347.6

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.3>

Влияние землетрясений на активизацию разлома и его демпфирующий эффект для деформационных и сейсмических волн

С. А. Борняков

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия
Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

А. И. Мирошниченко

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия
Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Д. В. Салко, А. Н. Шагун, А. А. Добрынина, Л. А. Усынин

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Рассматривается важная и малоизученная проблема взаимосвязи разломов и землетрясений. Суть исследования сводится к выяснению, с одной стороны, влияния землетрясений на тектоническую активизацию пассивных разломов за пределами очаговых зон, с другой стороны, наоборот, влияния разломов на динамические параметры проходящих через них сейсмических волн от землетрясений. В основу статьи положены оригинальные данные сейсмо-деформационного мониторинга на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. Полученные результаты и их анализ показывают, что медленные деформационные и сейсмические волны, генерируемые соответственно медленными и обычными землетрясениями, проходя через разлом, способствуют его активизации. Вызванные ими смещения его крыльев при однократном волновом воздействии составляют всего первые десятки – первые сотни микрон. Однако многократное повторение этого воздействия в течение длительного времени будет приводить к значительной кумулятивной амплитуде смещения на разломе. В то же время сам разлом, отнимая часть динамической энергии проходящих через него волн, при своей активизации способствует снижению их параметров, выступая по отношению к ним естественным демпфером.

Ключевые слова: сейсмо-деформационный мониторинг, разлом, землетрясение, медленная деформационная волна, сейсмические волны.

Для цитирования: Влияние землетрясений на активизацию разлома и его демпфирующий эффект для деформационных и сейсмических волн / С. А. Борняков, А. И. Мирошниченко, Д. В. Салко, А. Н. Шагун, А. А. Добрынина, Л. А. Усынин // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 30. С. 3–12. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.3>

Введение

При сейсмическом микрорайонировании особое внимание уделяется инженерно-геологическим и другим факторам, способствующим локальному усилению сейсмической интенсивности относительно ее базовой величины. Основным фактором обоснованно считаются грунтовые условия на

тестируемой площади. При наличии в ее пределах разломов учитываются их потенциальное пассивное и активное влияние [Несмеянов, 2004; Региональные шкалы ... , 2003]. В первом случае при достаточной ширине зоны разлома допускается усиление в ее пределах сейсмического эффекта, во втором случае учитывается возможная реализация по ним быстрых или медленных деформаций, которые могут привести к разрушению располагающихся в областях их динамического влияния зданий и сооружений. При этом остается вне рассмотрения характер взаимоотношений сейсмических волн и разлома. Влияют ли сейсмические волны на кинематику разломов за пределами очаговой области? С другой стороны, влияет ли разлом на изменение параметров проходящей через него сейсмической волны, или, другими словами, отличается ли сейсмическая интенсивность в разных крыльях разлома? Эти вопросы пока остаются открытыми, и отчасти ответы на них дают представленные в настоящей статье оригинальные результаты, полученные авторами в процессе сейсмо-деформационного мониторинга на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне (ЮБГП).

Методические вопросы мониторинга и постановка задачи

В пределах ЮБГП действуют четыре пункта мониторинга – «Тырган», «Листвянка», «Талая» и «Монды» (рис. 1), оснащенные инструментальными комплексами авторской разработки, состоящими из датчиков, аналого-цифровых преобразователей и прибора сбора и передачи данных на удаленный базовый сервер. Опрос датчиков аналого-цифровым преобразователем осуществляется 8 раз в секунду. Раз в 10 секунд в базу данных отправляется одно значение, представляющее собой среднее по 80 значениям, накопленным за этот временной интервал. Такая процедура осреднения способствует повышению точности измерений и снижению их погрешности.



Рис. 1. Положение пунктов мониторинга «Тырган», «Листвянка», «Талая» и «Монды» в пределах Южно-Байкальского геодинамического полигона. Красным кружком показано положение эпицентра землетрясения 29.03.2019 ($K = 13,3$)

В пункте «Талая» создана пространственная сеть из десяти датчиков в штольне. Девять из них имеют базу 6 м и установлены горизонтально на полу штольни, и один датчик с базой 2 м установлен вертикально. В нескольких метрах от датчика 10 проходит круто падающий на юго-запад разлом с зоной дробления шириной первые десятки сантиметров (рис. 2).

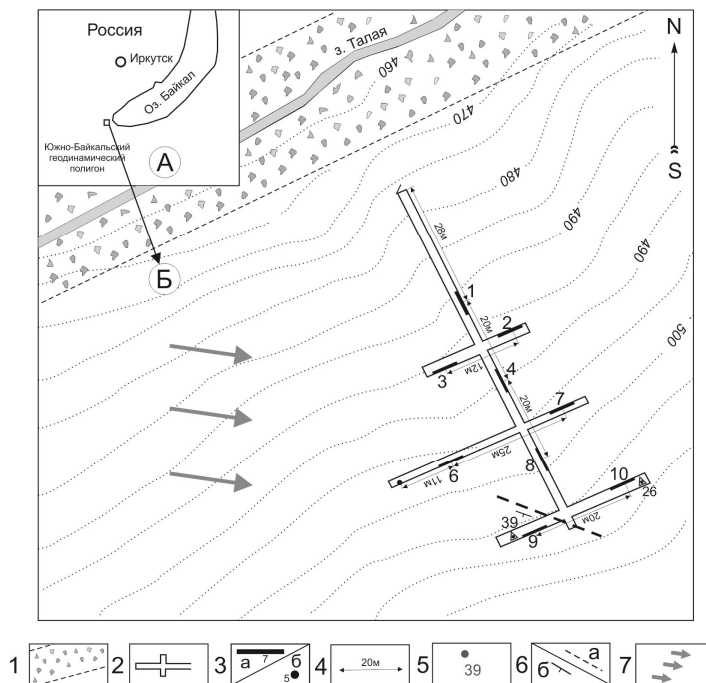


Рис. 2. Расположение (А) и устройство пункта мониторинга «Талая» (Б).

1 – зона разлома; 2 – штольня; 3 – горизонтальный (а) и вертикальный (б) штанговые датчики и их номера; 4 – расстояние между датчиками; 5 – сейсмостанция и ее номер; 6 – разлом (а) и направление его падения (б); 7 – направление движения медленной деформационной и сейсмической волн от очага землетрясения 29.03.2019

Обработка временных рядов данных деформационного мониторинга осуществляется специально созданной авторской компьютерной программой, позволяющей фильтровать исходную выборку для исключения из кумулятивной деформации тех или иных компонент, убирать трендовую составляющую, производить расчет корреляционной функции для пар датчиков. Используемый способ обработки данных ориентирован на выделение волновой составляющей деформационного процесса и при наличии в нем периодических деформационных волн дает возможность примерно оценивать их основные параметры: длину волны, период и скорость пространственной миграции.

Типы фиксируемых в процессе мониторинга деформационных волн и их характеристика приведены в серии публикаций [Instrumental Recording ... , 2017], где показано, что в массиве горных пород в пределах штольни эпизодически фиксируется резкое кратковременное увеличение деформа-

ций. Среди них выделяются одиночные волны, выраженные во временных рядах данных асимметричными импульсами с амплитудами в десятки микрон и длинами волн в сотни метров. Они проходят транзитом через все точки мониторинга и, как правило, сопровождаются остаточными деформациями в первые микроны. Скорость пространственной миграции волн непостоянна и составляет от первых сантиметров до десятков сантиметров в секунду и более, что позволяет отнести их к категории медленных деформационных волн (МДВ) [Richter, 1958; Mogi, 1968; Быков, 1999, 2005]. Источники этих волн находятся за пределами пунктов мониторинга и, вероятно, обусловлены медленными землетрясениями (silent earthquake) [Peng, Gombert, 2010].

Для более детального изучения динамических параметров этих МДВ и их изменений при прохождении через зону разлома в пункте «Талая» был выполнен сейсмо-деформационный мониторинг в марте – апреле 2019 г. На время его проведения рядом с датчиками 9 и 10 были установлены сеймостанции Baikal-7HR с датчиками СК-1 рабочим диапазоном частот 0,5–5 Гц (см. рис. 2).

Результаты

В процессе мониторинга была зафиксирована уникальная ситуация. 27.03.2019 с 4 ч 58 мин по Гринвичу штанговыми датчиками и сеймостанциями зарегистрирована одиночная МДВ, амплитуды и периоды спектра колебаний которой на сейсмограмме соответствуют медленному землетрясению (рис. 3). По расчетным данным, его очаг располагался на северо-запад от пункта мониторинга на расстоянии в первые десятки километров (см. рис. 2). Скорость миграции МДВ, рассчитанная по временной разнице достижения максимальных деформаций в точках 10 и 9, оценена в 1,3 м/с, или 112,3 км/сут.

По данным сеймостанций 39 и 26, зарегистрированные горизонтальные скорость (V) и амплитуда (A) смещения по оси X составили: $V_{39} = 2069$, $V_{26} = 0,7$ мкм/с и $A_{39} = 150$ и $A_{26} = 0,005$ мкм (см. рис. 3).

Прохождение МДВ через датчики отразилось в виде импульсов деформаций, величины которых в точках 9 и 10 (см. рис. 2, Б) равны 120 и 60 мкм соответственно. Пример импульсного увеличения деформации в точке 10 показан на рис. 4.

Через два дня после медленного произошло обычное землетрясение (29.03.2019 в 22 ч 23 мин 53 с по Гринвичу) энергетического класса $K = 13,3$, с эпицентром в зоне Тункинского разлома (координаты: 51,71 с. ш., 101,54 в. д.). Сейсмический эффект от него отчетливо зарегистрирован сеймостанциями в пункте «Талая» (рис. 5), но при этом почти не нашел отражения в деформациях горных пород. Слабый отклик на него в виде резкого увеличения деформаций на 1,5–2,0 мкм зафиксирован только в пункте «Монды», который располагается в 40–45 км от эпицентра землетрясения, что в три раза ближе, чем пункт «Талая» (см. рис. 1). По данным сеймостанций 39 и 26, зарегистрированные горизонтальные скорость (V) и амплитуда (A) смещения по оси X составили: $V_{39} = 388$, $V_{26} = 388$ мкм/с и $A_{39} = 35$ и $A_{26} = 32$ мкм.

Обсуждение результатов

Считается, что кумулятивная амплитуда смещения на активном разломе складывается из крипа [Kasahara, 1985] и совокупности прерывистых частных смещений, следствием которых, в зависимости от скорости их реализации, являются обычные [Reid, 1910; Brace, Byerlee, 1966] или медленные (тихие) [Peng, Gomberg, 2010] землетрясения, и что все эти смещения обусловлены тектоническим напряжением, действующим в области его динамического влияния.

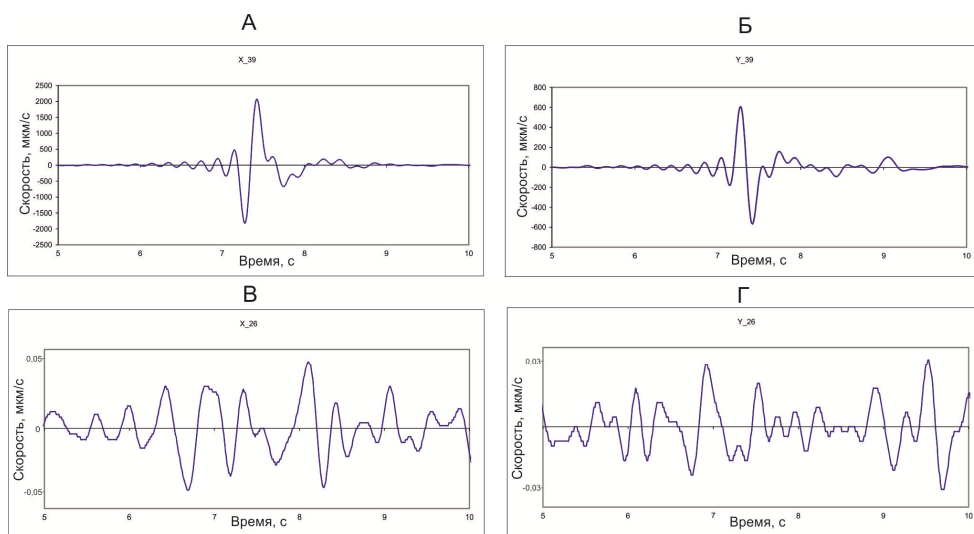


Рис. 3. Графики скоростей МДВ по осям X и Y в точке 9 (А, Б) и 10 (В, Г) пункта мониторинга «Талая» по показаниям сейсмостанций 36 и 28 соответственно.

Ось X ориентирована вдоль основного хода штольни

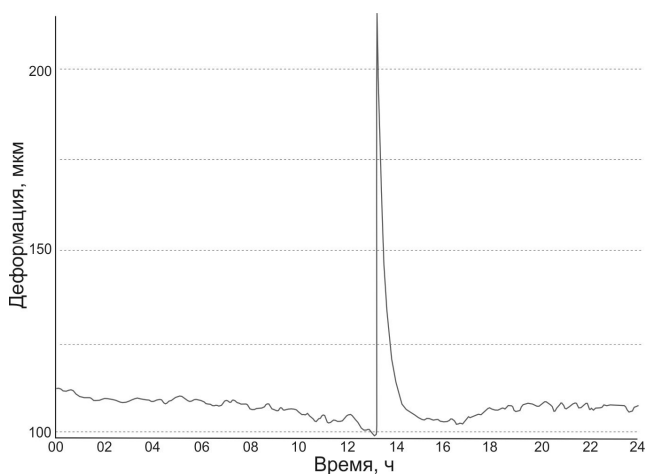


Рис. 4. Импульсное увеличение деформации в точке 10 пункта мониторинга «Талая» при прохождении одиночной МДВ от медленного землетрясения 27.03.2019

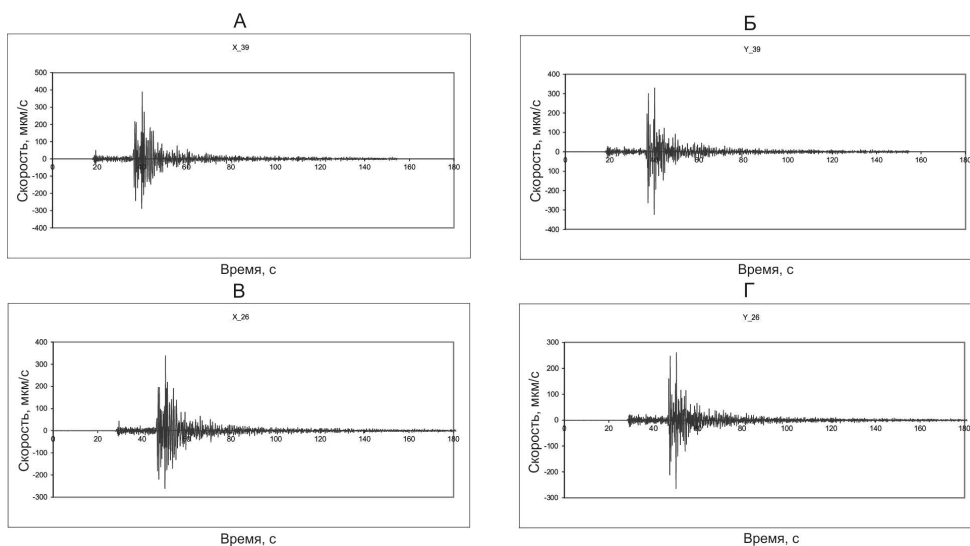


Рис. 5. Графики зависимости скорости сейсмических волн, зарегистрированных сейсмостанциями 39 и 26 в точках 10 и 9 в пункте мониторинга «Талая»

Представленные выше результаты сеймо-деформационного мониторинга в пункте «Талая» Южно-Байкальского геодинамического полигона показывают, что сейсмические волны, порождаемые обычными и медленными землетрясениями, распространяясь в разломно-блоковой среде литосферы, способны активизировать встречающиеся на их пути разломы с реализацией смещений по ним. Так, МДВ от близкого медленного землетрясения инициировала взбросо-сдвиговое смещение по тестируемому разлому в пределах самого пункта с амплитудой более ста микрон.

Импульсный, но растянутый во времени на десятки секунд рост деформаций в смежных с разломом блоках и последующая их деградация в течение полутора часов указывает на их неупругий характер. Сейсмические волны от обычного землетрясения энергетического класса $K = 13,3$, следовавшего через два дня после медленного, очаг которого располагался в зоне Тункинского разлома (см. рис. 1), вызвали аналогичное по кинематике смещение на тестовом разломе амплитудой в десятки микрон. Меньший кинематический отклик разлома в последнем случае по сравнению с первым объясняется существенно большей удаленностью очага обычного землетрясения от пункта мониторинга.

Попарное сопоставление данных по деформациям, измеренных штанговыми датчиками 9 и 10, и параметров сейсмических волн, полученных сейсмостанциями 26 и 39, в смежных крыльях тестового разлома указывает на его демпфирующий эффект при прохождении через него медленной деформационной и сейсмических волн. Это достигается за счет трансформации части динамической энергии этих волн в кинетическую, с реализацией подвижки по тестовому разлому. Выявленный эффект следует учитывать в целях сейсмобезопасности при проектировании мест расположения архитектурных сооружений и транспортных систем.

Заключение

Приведенные выше результаты мониторинга дают однозначные ответы на поставленные во введении вопросы о характере взаимоотношений сейсмических волн разной динамической природы и разлома. На оригинальных данных, полученных при сейсмо-деформационном мониторинге на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне, показано, что, с одной стороны, медленные деформационные волны и сейсмические волны, генерируемые соответственно медленными и обычными землетрясениями, проходя через разлом, способствуют его активизации. Вызванные ими смещения его крыльев при однократном волновом воздействии составляют всего первые десятки – первые сотни микрон. Однако многократное повторение этого воздействия в течение длительного времени будет приводить к значительной кумулятивной амплитуде смещения на разломе. С другой стороны, сам разлом, отнимая часть динамической энергии проходящих через него волн при своей активизации, способствует снижению их параметров, выступая по отношению к ним естественным демпфером.

Исследования проводились при частичной поддержке интеграционной программы ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей» (0341-2015-0001)» с использованием уникальной научной установки «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов».

Список литературы

- Быков В. Г. Сейсмические волны в пористых насыщенных породах. Владивосток : Дальнаука, 1999. 108 с.
- Быков В. Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46 (11). С. 1176–1190.
- Несмеянов С. А. Инженерная геотектоника М. : Наука, 2004, 780 с.
- Региональные шкалы сейсмической интенсивности (опыт создания шкалы для Прибайкалья) / С. И. Шерман, Ю. А. Бержинский, В. А. Павленов, Ф. Ф. Аптикаев. Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 189с.
- Brace W. F., Byerlee J. D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science. 1966. N 153. P. 990–992.
- Instrumental Recording of Slow Deformation Waves in the South Baikal Geodynamic Study Site / S. A. Borneyakov, D. V. Salko, K. Zh. Seminsky, S. Demberel, D. Ganzorig, T. Batsaihan, S. Togtohbayar // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 473, N 1. P. 371–374.
- Kasahara K. Migration of crustal deformation // Tectonophysics. 1979. Vol. 52, N 1–4. P. 329–341. doi.org/10.1016/0040-1951(79)90240-3
- Mogi K. Migration of seismic activity // Bull. Earthq. Res. Inst. 1968. N 46. P. 53–74.
- Peng Z., Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature Geoscience. 2010. Vol. 3. P. 599–607. doi.org/10.1038/ngeo940
- Reid H.F. The elastic-rebound theory of earthquakes. University of California Publ. Geol. Sci. 1911. V. 6. 413-444.
- Richter C. F. Elementary Seismology. San Francisco : W. H. Freeman, 1958. 768 p.

The Effect of Earthquakes on the Activation of the Fault and Its Damping Effect for Deformation and Seismic Waves

S. A. Bornyakov

*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation*

A. I. Miroshnichenko

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

D. V. Salko, A. N. Shagun, A. A. Dobrynina, L. A. Usynin

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the important and little-studied problem of the relationship between faults and earthquakes. The problem can be expressed by two questions. How earthquakes affect the tectonic activation of passive fault outside the focal areas? How the fault affect on dynamic parameters of seismic waves passing through them? These questions remain open and partly the answers to them are provided by the original results presented in the article, obtained by the authors during the seismic and deformation monitoring at the South Baikal Geodynamic Range (SBGP). It is shown that, on the one hand, slow deformation waves and seismic waves generated, respectively, by slow and ordinary earthquakes, passing through the fault, contribute to its activation. A single wave impact causes fault shifts in the first tens to first hundreds of microns. However, repeated repetition of this impact over a long period of time will result in a significant cumulative amplitude of displacement on the fault. On the other hand, the activated fault takes away some of the dynamic energy of the waves passing through it and contributes to the reduction of wave parameters. In this case, the fault is a damper for seismic waves and reduces the seismic effect of them.

Keywords: seismic-deformation monitoring, fault, earthquake, slow deformation wave, seismic waves.

For citation: Bornyakov S. A., Miroshnuchenko A. I., Salko D. V., Shagun A. N., Dobrynina A. A., Usynin L. A. The Effect of Earthquakes on the Activation of the Fault and Its Damping Effect for Deformation and Seismic Waves. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2019, vol. 30, pp. 3-12. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.3> (in Russian)

References

- Bykov V.G. *Seismicheskie volny v poristyh nasyschennykh porodah* [Seismic waves in porous saturated rocks]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1999. 108 p.
- Bykov V.G. Deformacionnye volny Zemli: koncepciya, nablyudeniya i modeli [Deformation waves of the Earth: concept, observations and models]. *Geologiya i geofizika*, 2005, vol. 46 (11), pp. 1176-1190.
- Nesmeyanov S.A. *Inzenernaia geologiya* [Engineering Geotectonics]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 780 p. (in Russian).
- Sherman S.I., Berginsky Y.A., Pavlenov V.A., Aptikaev F.F. *Regionalnie shkali seismicheskoi intensivnosti (opyt sozdaniya shkali dlya Pribaikaliya)* [Regional scale of seismic intensity (experience of creating a scale for Pribaikalya)]. Novosibirsk, Geo Publ., 2003, 189 p. (in Russian).
- Bornyakov S.A., Salko D.V., Seminsky K.Zh., Demberel S., Ganzorig D., Batsaihan T., Togtohbayar S. Instrumental Recording of Slow Deformation Waves in the South Baikal Geodynamic Study Site. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 473, no. 1, pp. 371-374.

Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake. *Science*, 1966, no. 153, pp. 990-992.

Kasahara K. Migration of crustal deformation. *Tectonophysics*, 1979, vol. 52, no. 1-4, pp. 329-341. doi.org/10.1016/0040-1951(79)90240-3

Mogi K. Migration of seismic activity. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 1968, no. 46, pp. 53-74.

Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. *Nature Geoscience*, 2010, vol. 3, pp. 599-607. doi.org/10.1038/ngeo940

Reid H.F. The elastic-rebound theory of earthquakes. University of California Publ. *Geol. Sci.* 1911. V. 6. 413-444.

Richter C.F. *Elementary Seismology*. W. H. Freeman, San Francisco, 1958, 768 p.

Борняков Сергей Александрович

кандидат геолого-минералогических наук,

старший научный сотрудник,

лаборатория тектонофизики

ORCID ID 0000-0002-5119-1092

Институт земной коры СО РАН

Россия, 664033, г. Иркутск,

ул. Лермонтова, 128

тел.: 8 (3952) 42-61-83

Иркутский государственный университет

Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

e-mail: bornyak@crust.irk.ru

Bornyakov Sergey Alexandrovich

Candidate of Sciences (Geology and

Mineralogy), Senior Researcher,

Laboratory of Tectonophysics

Institute of the Earth's Crust SB RAS

128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,

Russian Federation

tel.: 8 (3952) 42-61-83

Irkutsk State University

1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,

Russian Federation

e-mail: bornyak@crust.irk.ru

Мирошниченко Андрей Иванович

кандидат геолого-минералогических наук,

старший научный сотрудник,

лаборатория современной геодинамики

Институт земной коры СО РАН

Россия, 664033, г. Иркутск,

ул. Лермонтова, 128

тел.: 8 (3952) 42-95-34

Иркутский научный центр СО РАН

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134

e-mail: mai@crust.irk.ru

Miroshnichenko Andrei Ivanovich

Candidate of Sciences (Geology and

Mineralogy), Senior Researcher,

Laboratory of Recent Geodynamics

Institute of the Earth's Crust SB RAS

128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,

Russian Federation

tel.: 8 (3952) 42-95-34

Irkutsk Scientific Center SB RAS

134, Lermontov st., Irkutsk, 664033,

Russian Federation

e-mail: mai@crust.irk.ru

Салко Денис Владимирович

ведущий инженер, лаборатория

тектонофизики

ORCID ID: 0000-0001-5119-8165

Институт земной коры СО РАН

Россия, 664033, г. Иркутск,

ул. Лермонтова, 128

тел.: 8 (3952) 42-61-83

e-mail: denis@salko.net

Salko Denis Vladimirovich

Lead Engineer, Laboratory of Tectonophysics

Institute of the Earth's Crust SB RAS

128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,

Russian Federation

tel.: 8 (3952) 42-61-83

e-mail: denis@salko.net

Шагун Артем Николаевич

ведущий инженер, лаборатория

инженерной сейсмологии и сейсмогеологии

Институт земной коры СО РАН

Shagun Artem Nikolaevich

Lead Engineer, Laboratory of Engineering

Seismology and Seismogeology

Institute of the Earth's Crust SB RAS

*Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: (83952) 42-58-23
e-mail: shagun@crust.irk.ru*

Добрынина Анна Александровна
*кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория инженерной сейсмологии
и сейсмогеологии
ORCID ID: 0000-0002-2087-4202
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: 8 (3952) 42-58-23
e-mail: dobrynina@crust.irk.ru*

Усынин Леонид Андреевич,
*младший научный сотрудник,
лаборатория инженерной сейсмологии
и сейсмогеологии
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: (83952) 42-58-23
e-mail: usyninla@yandex.ru*

*128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: 8 (3952) 42-58-23
e-mail: shagun@crust.irk.ru*

Dobrynina Anna Alexandrovna
*Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Senior Researcher, Laboratory
of Engineering Seismology and
Seismicgeology
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: dobrynina@crust.irk.ru*

Leonid Usninin
*Lead Engineer, Laboratory of Engineering
Seismology and Seismicgeology
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: 8 (3952) 42-58-23
e-mail: usyninla@yandex.ru*

Дата поступления: 23.09.2019
Received: September, 23, 2019