



УДК 551.24.02

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.44>

Эволюция разрывной структуры сдвиговой зоны как периодический процесс (по результатам физического моделирования)

А. А. Каримова

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

С. А. Борняков

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

Аннотация. Представлены результаты физического моделирования процесса формирования деструктивной зоны сдвига в упруговязкопластичной модели литосферы с целью изучения стадийной периодичности развития деформационной эволюции составляющих ее внутреннюю структуру систем разрывов. Исследование основано на использовании многолетнего опыта предшественников по изучению стадийности развития процесса разрывообразования, но направлено на изучение проявлений периодичности на более низких масштабных уровнях, чем это было сделано ранее. Рассмотрены условия проведения экспериментальных работ, позволяющих воспроизводить в моделях процессы формирования деструктивных зон литосферы в условиях сдвига. Проведен комплекс экспериментальных работ для достижения поставленной цели. Для получения представлений о деталях процесса на начальной стадии были оценены вариации амплитуды смещения по простиранию протяженных разрывов и вариации пластических деформаций модельного материала в смежных блоках. При анализе этих параметров отмечается их изменение во времени по определенному тренду в колебательном режиме. В ходе исследования также выявлено, что стадии формирования сдвиговой зоны подразделяются на этапы, которые делятся на периоды, а те в свою очередь состоят из циклов.

Ключевые слова: физическое моделирование, зона сдвига, деформационная эволюция.

Для цитирования: Каримова А. А., Борняков С. А. Эволюция разрывной структуры сдвиговой зоны как периодический процесс (по результатам физического моделирования) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 44–52. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.44>

Введение

Тектонофизический подход определяет зону сдвига как объемное геологическое тело, характеризующееся определенной внутренней структурой. Структурная эволюция сдвиговых зон происходит с определенной последовательностью появления и развития в их пределах пластических и разрывных деформаций. На момент ее заложения в ней формируются пликативные, складчатые структуры, а в дальнейшем – системы разноранговых разрыв-

ных нарушений [Гзовский, 1975; Стоянов, 1977; Tchalenko, 1970; Ravoni, 1961]. Они развиваются путем прорастания и избирательного объединения первичных мелких разрывов в более крупные, с последующим образованием единого магистрального сместителя, и этот процесс реализуется с определенной периодичностью, подразделяясь на три стадии [Разломообразование в литосфере ... , 1991; Семинский, 2003]. Выявленная стадийность характеризует повторяемость деформационного процесса в масштабе всей сдвиговой зоны в целом.

Для определения периодичности процесса эволюции разрывной структуры сдвиговой зоны на меньших пространственных и временных масштабных уровнях авторами проведена специальная серия экспериментов на упруговязкопластичных моделях литосферы по стандартной методике.

Метод физического моделирования, техника проведения экспериментов и характеристика получаемого с моделей фактического материала

Проведенное исследование опиралось на метод физического моделирования, который хорошо зарекомендовал себя при решении различных вопросов разломообразования, в том числе в сдвиговых зонах [Разломообразование в литосфере ... , 1991; Семинский, 2003; McClay, 1996; Dooley, Schreurs, 2012].

Эксперименты выполнялись с соблюдением условий подобия, определяемых по критерию-комплексу:

$$\frac{\eta}{\rho g L T} = \text{const},$$

где η – вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – линейные размеры, м; T – время, с.

Правомерность использования данного критерия-комплекса обсуждалась в серии работ [Гзовский, 1975; Шерман, 1984; Hubbert, 1937]. Уравнение позволяет вычислить масштабные коэффициенты для каждого из использованных в нем физических параметров.

В проведенной серии экспериментов модели стандартного размера (длина $L_m = 1,5$ м, ширина $M_m = 0,5$ м и высота $H_m = 0,1$ м) с вязкостью $\eta = 10^6$ Па·с деформировались с постоянными скоростями $V = 10^{-5}$ м/с или $V = 5 \cdot 10^{-5}$, что в пересчете через коэффициенты подобия ($C_l \cdot 10^6$; $C_\eta \cdot 10^{16}$, $C \cdot 10^{11}$) соответствует формированию сдвиговой зоны в блоке литосферы длиной 1500 км, шириной 500 км, мощностью 100 км, деформированном со скоростями 0,5 мм/год или 1 мм/год. Детальнее процесс подготовки и осуществления экспериментов описан в [Разломообразование в литосфере ... , 1991]. Исходным фактическим материалом являлись фотографии моделей с развивающимся в них процессом формирования сдвиговой зоны. Развивающийся в модели процесс в зависимости от характера решаемой задачи фотографировался с дискретностью от 1 до 30 с. Для сбора необходимой информации выбиралась серия фотографий, отражающая только первую стадию развития процесса разрывообразования в сдвиговой зоне. Для форми-

рующей в эту стадию разрывной структуры были условно выделены три масштабных уровня – глобальный, региональный и локальный (рис. 1). Глобальный охватывает всю зону в целом, региональный – ее часть с группой разрывов и вычленяемых ими блоков, а локальный включает в себя только отдельные разрывы и смежные с ними блоки. С точки зрения такой типизации отмеченная выше стадийность деформационного процесса в сдвиговой зоне отражает его периодичность на глобальном масштабном уровне.

Для получения представлений о деталях процесса разрывообразования на региональном уровне с каждой из выбранных для анализа фотографий в пределах выделенной в сдвиговой зоне рабочей прямоугольной площадки размером $0,275 \times 0,125$ м собраны данные по следующим параметрам:

- общему количеству разрывов без ранжирования их по длине (N);
- суммарной длине всех разрывов (L);
- накопленной на всех разрывах амплитуде смещения (A).

Для характеристики локального уровня по отдельным наиболее крупным разрывам, выбранным в качестве эталонных, и смежным с ними блокам собраны замеры следующих параметров (рис. 1, Б):

- накопленной амплитуды смещения на разрыве (a_i) и ее приращения (Δa_i) за контрольный интервал времени;
- изменений расстояния между парами реперных линий (m_i) в смежных с разрывом блоках и его приращений за контрольные интервалы времени (Δm_i) за счет пластической деформации.

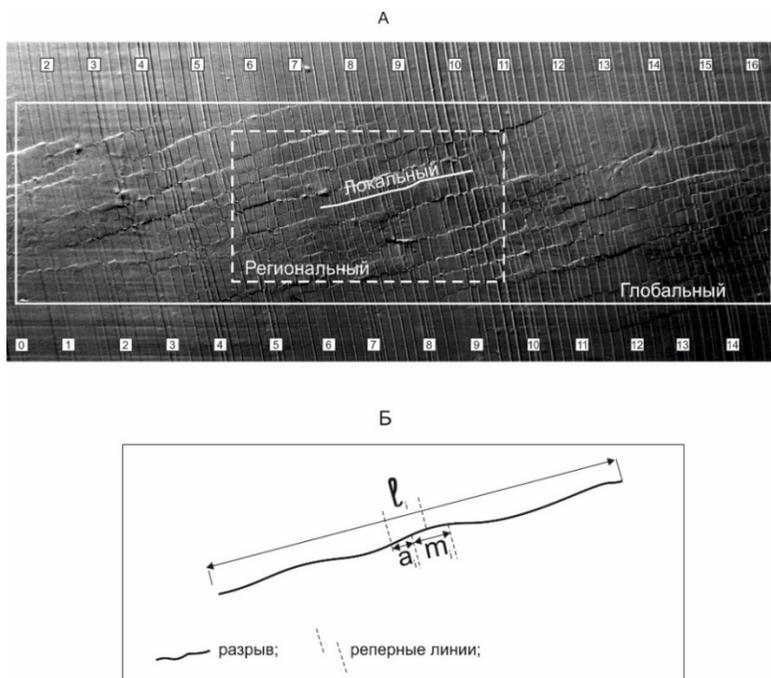


Рис. 1. Схема масштабных уровней разрывно-блоковой структуры сдвиговой зоны (А) и измеряемые параметры разрывов:

l_i – длина, a_i – амплитуда смещения, m_i – расстояние между реперами (Б)

Результаты и их обсуждение

Обработка данных по перечисленным выше количественным параметрам, собранным по фотографиям разных экспериментов, проведенных при одинаковых граничных условиях, показала хорошую повторяемость получаемых результатов, что указывает на закономерный характер вариаций тестовых параметров. Это позволяет сократить количество представляемого графического материала, ограничиться демонстрацией результатов отдельных экспериментов.

На рисунке 2 представлены результаты обработки фотоматериалов эксперимента, выполненного в описанных выше граничных условиях при скорости деформирования модели $5 \cdot 10^{-5}$ м/с. Приведенные графики отражают коллективную деформационную динамику разрывных нарушений в сдвиговой зоне на региональном уровне в первую стадию ее формирования. Из графиков следует, что процесс разрывообразования в пределах стадии развивается с определенной периодичностью в виде повторяющихся вариаций тестовых параметров. Для выбранных граничных условий эксперимента их длительность лежит в пределах 1,5–2,0 мин. В рамках исследуемой стадии имеют место три такие вариации, что позволяет говорить о реализации трех качественно повторяющихся деформационных этапов. Сопоставление графиков показывает в целом достаточно высокую степень согласованности в поведении всех трех рассмотренных параметров разрывов (см. рис. 2, *А, Б, В*).

Периодичность деформационного процесса проявляется и на локальном уровне, что прослеживается в вариациях суммарных, кумулятивных амплитуд смещений (a_i) и их приращений (Δa_i) за единичные интервалы времени на отдельных разрывах (рис. 3, *А, Б*), а также в вариациях расстояния между реперами (m_i) и его приращений (Δm_i), отражающих пластическую деформацию модельного материала в краевых частях смежных с этим разрывом блоков (рис. 3, *В, Г*).

Из приведенных графиков видно, что накопленная амплитуда смещения и расстояние между реперами изменяются во времени по определенным трендам в колебательном режиме. Первый параметр (a_i) в целом возрастает, испытывая кратковременные снижения на границах этапов (см. рис. 3, *А*). Отдельная его вариация «рост – снижение» является отражением реализации на разрыве поступательного и последующего реверсного смещения, под которыми понимаются движения, согласные с направлением движения активного крыла формирующейся сдвиговой зоны и противоположные ему соответственно. Первые способствуют увеличению суммарной амплитуды смещения на разрыве, тогда как вторые, наоборот, уменьшают ее. По поведению осевой линии кривой параметра a_i (см. рис. 3, *А*) видно, что на границах этапов общий рост суммарной амплитуды смещения на разрыве сменяется уменьшением, что указывает на преобладание по нему подвижек обратного знака в этот переходный временной интервал. По мере приближения к концу каждого этапа возрастает амплитуда вариаций параметров a_i и Δa_i . Второй параметр (m_i), в отличие от первого, в целом снижается, испытывая кратковременное увеличение на границах этапов. В данном случае его увеличение и уменьшение обусловлено деформациями растяжения и сжатия соответственно. Таким образом, краевые участки смежных с разрывом блоков, находящиеся большую

часть времени в рамках этапов в условиях сжатия, в переходные временные интервалы между этапами испытывают кратковременное растяжение. Из сопоставления на рис. 3 графиков А и Б с графиками В и Г следует, что деформационные активности разрыва и смежных с ним блоков, определяемые по амплитудам их вариаций, находятся в противофазе.

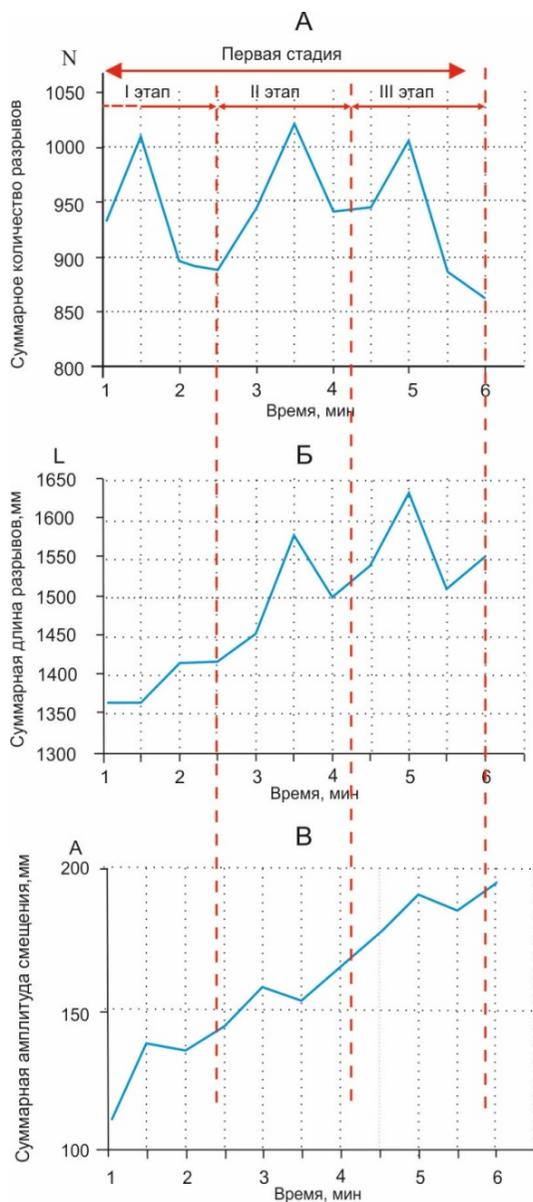


Рис. 2. Три вариации параметров, соответствующие трем этапам процесса разрывообразования в первую стадию развития сдвиговой зоны:

А – количество разрывов, Б – суммарная длина разрывов,
В – накопленная на разрывах амплитуда смещения

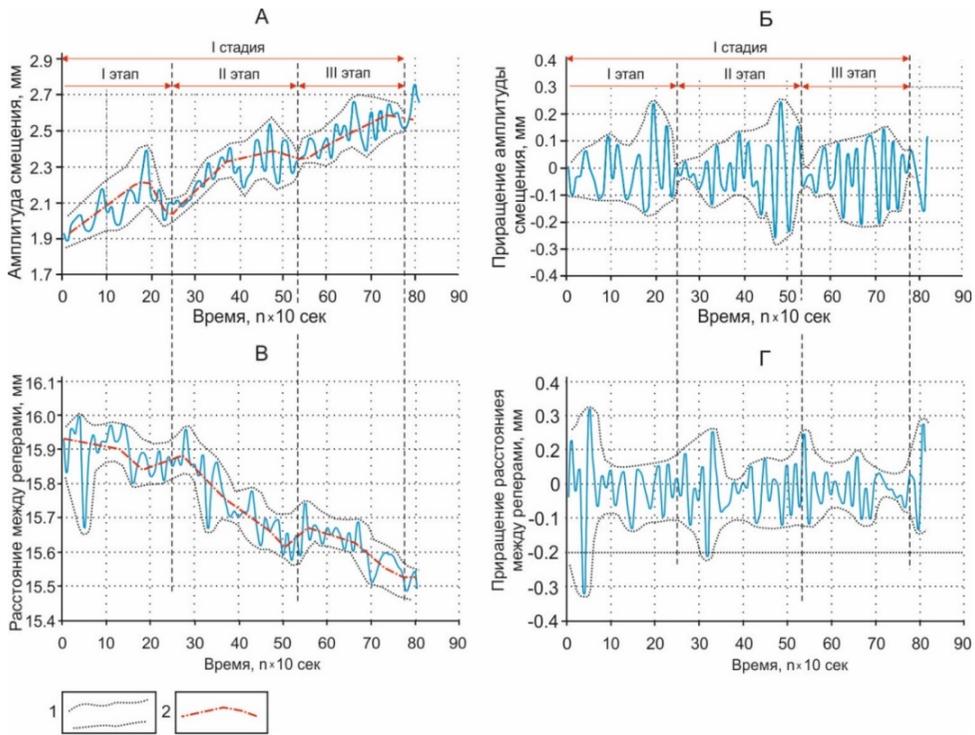


Рис. 3. Периодические вариации двух параметров, соответствующие трем этапам разрывообразования в первую стадию развития сдвиговой зоны:

А – накопленная амплитуда смещения на разрыве (a_i); Б – приращения амплитуды смещения на разрыве (Δa_i) за единичный временной интервал; В – пластическая деформация смежного с разрывом блока (m_i); Г – приращения за единичный временной интервал (Δm_i). 1 – верхняя и нижняя огибающие кривых; 2 – осевая линия кривых

Этап процесса разрывообразования не является конечной единицей временного масштабного ряда. Он подразделяется на более дробные временные интервалы, в пределах которых реализуются группы вариаций и отдельные частные вариации (рис. 4). Первые могут быть определены как «периоды», а вторые по аналогии с сейсмологической терминологией [Федотов, 1968] как «циклы». Таким образом, разномасштабные периодичности процесса разрывообразования в сдвиговой зоне в целом укладываются в ряд «стадия – этап – период – цикл».

Заключение

В статье представлены результаты физического моделирования процесса формирования зоны сдвига в упруговязкопластичной модели литосферы, выполненного с целью изучения дальнейшего развития ранее выявленной повторяемости деформационного процесса в виде стадий.

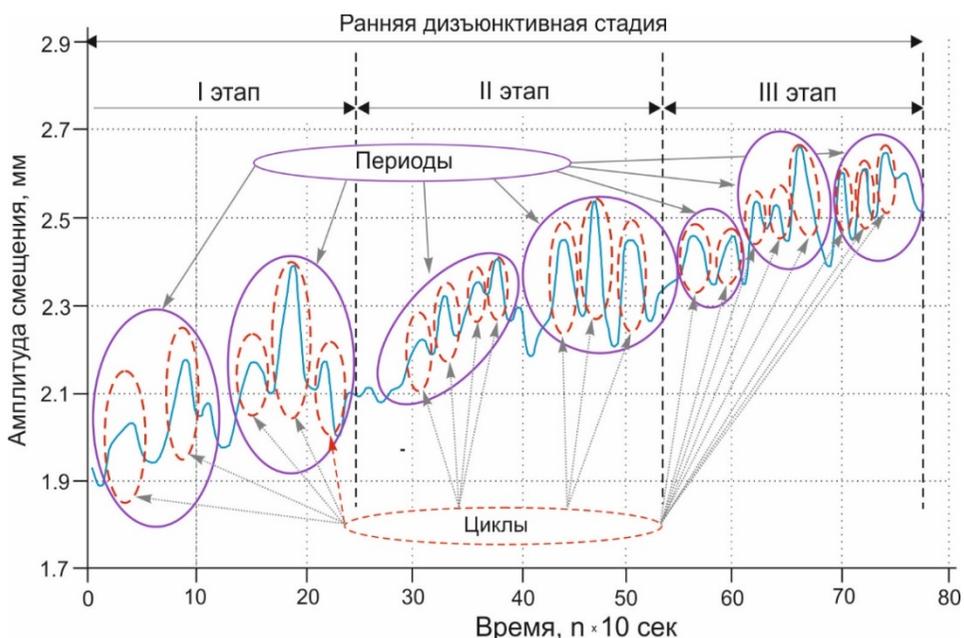


Рис. 4. Периодичности разрывообразования в пределах этапов в виде периодов и циклов

Приведенные экспериментальные результаты позволяют обнаруженную ранее периодичность процесса разрывообразования в сдвиговой зоне на глобальном уровне в виде стадий дополнить периодичностями более низких масштабных уровней. По анализу изменения параметров амплитуды смещения и пластических деформаций модельного материала установлено, что на региональном и локальном уровнях стадии формирования сдвиговой зоны подразделяются на этапы, которые делятся на группы вариаций, или периоды, состоящие в свою очередь из единичных вариаций, или циклов. В целом разномасштабные периодичности процесса разрывообразования в сдвиговой зоне укладываются в ряд «стадия – этап – период – цикл».

Исследования выполнены в рамках базового проекта № 0346-2018-0003 «Тектонофизика современных геодинамических процессов в литосфере Центральной Азии как основа прогноза чрезвычайных ситуаций природного характера» 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 (УНУ) «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов».

Список литературы

- Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М. : Наука, 1975, 536 с.
 Разломообразование в литосфере: зоны сдвига / С. И. Шерман, К. Ж. Семинский, С. А. Борняков, В. Ю. Буддо, Р. М. Лобацкая, А. Н. Адамович, В. А. Трусков, А. А. Бабичев. Новосибирск : Наука, 1991. 261 с.

Семинский К. Ж. Внутренняя структура континентальных разрывных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск : Гео, 2003, 244 с.

Стоянов С. С. Механизм формирования разрывных зон. М. : Недра, 1977. 114 с.

Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М. : Наука, 1968, С. 121–150.

Шерман С. И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. 1984. № 3. С. 8–18.

Dooley T. P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results // Tectonophysics. 2012. N 574–575. P. 1–71.

Hubbert M. K. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. Geological Society of America Bulletin. 1937. Vol. 48, N 10. P. 1459–1520. <http://dx.doi.org/10.1130/GSAB-48-1459>

McClay K. R. Recent advances in analogue modelling: Uses in section interpretation and validation // Geological Society Special Publication. 1996. Vol. 99. P. 201–225.

Pavoni N. Falting durch Horizontalverschiebung // Eclogae geol. Helv. 1961. Vol. 54. P. 515–534.

Tchalenko J. S. Similarities between shear zones of different magnitudes // Geological Society of America Bulletin. 1970. 81. P. 1625–1640.

The Evolution of the Discontinuous Structure of the Shear Zone as a Periodic Process (Based on Physical Modeling)

A. A. Karimova

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

S. A. Bornyakov

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

Abstract. The article presents the results of the physical modeling of the process of the destructive shear zone formation in elastic-viscous-plastic model of lithosphere. The simulation performed with the aim of identifying common regularities of evolution of deformation components of its internal structure of systems. Previously, it was found that the entire process of destructive shear zone formation consists of three stages. To get an idea of the details of the process at the regional and local levels, data on the parameters were collected and processed from the models: total number of discontinuities, total length, variations in the displacement amplitude and variations in the plastic deformations of the model material in adjacent blocks. The results of a new series of experiments showed that the stage is divided into stages, each of which in turn is divided into groups of variations and unit variations. The selected time intervals in the sequence “variation-group of variations-stage-period” characterize the qualitatively repeating dynamics of the deformation of fracture systems at different scale levels.

Keywords: physical modeling, destructive shear zone, deformation evolution.

For citation: Karimova A.A., Bornyakov S.A. The Evolution of the Discontinuous Structure of the Shear Zone as a Periodic Process (Based on Physical Modeling). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2020, vol. 33, pp. 44–52. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.44> (in Russian)

References

Gzovsky M.V. *Osnovy tectonofiziki* [Fundamentals of tectonophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 536 p. (in Russian)

Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Borneyakov S.A., Buddo V.Yu., Lobatskay R.M., Adamovich A.N., Truskov V.A., Babichev A.A. Razlomoobrazovanie v lithosphere: zoni sdviga [Faulting in the lithosphere: shear zones]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, 261 p. (in Russian)

Seminsky K.Zh. *Internal structure of continental discontinuous zones: tectonophysical aspect*. Novosibirsk, Publishing House GEO, 2003, 244 p. (in Russian)

Stoyanov S.S. *Mehanizm formirovaniya razryvnykh zone* [The mechanism of formation of zones]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 114 p. (in Russian)

Fedotov S.A. O seismicheskom cikle, vozmozhnosti kolichestvennogo raionirovaniya I doldosrochnom prognoze zemletryaseni [On the Seismic Cycle, Possibilities of Quantitative Seismic Zonation, and Long-term Earthquake Prediction]. *Seismic Zonation of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1968, pp. 121-150. (in Russian)

Sherman S.I. Fizicheskii experiment v tectonike i teoriya podobiya [Physical experiment in tectonics and theory of similarity]. *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], 1984, no. 3, pp.8-18. (in Russian)

Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 2012, no. 574-575, pp. 1-71.

Hubbert M.K. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 1937, vol. 48, no. 10, pp.1459-1520. <http://dx.doi.org/10.1130/GSAB-48-1459>

McClay K.R. Recent advances in analogue modelling: Uses in section interpretation and validation. *Geological Society Special Publication*, 1996, vol. 99, pp. 201-225.

Pavoni N. Falting durch Horizontalverschiebung. *Eclogae geol. Helv.*, 1961, vol. 54, pp. 515-534.

Tchalenko J.S. Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geological Society of America Bulletin*, 1970, vol. 81, pp. 1625-1640.

Каримова Анастасия Алексеевна

ведущий инженер, лаборатория
тектонофизики
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
старший преподаватель
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: tarasova@crust.irk.ru

Karimova Anastasiya Alekseevna

Lead Engineer, Laboratory of Tectonophysics
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Senior Lecturer
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: tarasova@crust.irk.ru

Борняков Сергей Александрович

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория тектонофизики
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
Иркутский научный центр СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 134
e-mail: bornyak@crust.irk.ru
ORCID ID 0000-0002-5119-1092

Borneyakov 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
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
Irkutsk Scientific Center SB RAS
134, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: bornyak@crust.irk.ru

Код научной специальности: 25.00.03

Дата поступления: 19.07.2020