

УДК: 539.422+550.3

ФРАГМЕНТАЦИЯ ЦИРКОНОВ В ЗОНЕ ИНТЕНСИВНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

© 2024 г. В. Е. Чинкин*, А. А. Остапчук

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: chinkin.ve@idg.ras.ru*

В настоящей работе исследованы особенности процесса разрушения минералов горных пород на масштабах 10^{-6} – 10^{-4} м в зонах интенсивных тектонических деформаций. Проведен статистический анализ закономерностей фрагментации цирконов, отобранных из осевой зоны Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны. Рассматривались микрофотографии кристаллов цирконов, выполненные в режимах обратноотраженных электронов или катодолюминесценции. Сегментация изображений цирконов выполнялась на основе алгоритмов искусственного интеллекта и экспертного мнения. Для описания статистических свойств разрушения цирконов выбраны три наиболее распространенные модели: степенная, экспоненциальная и логнормальная. Анализ, проведенный на основе статистики Колмогорова – Смирнова с использованием бутстрэп-метода, показал, что логнормальная модель наиболее эффективно описывает фрагментацию в условиях долговременных интенсивных тектонических деформаций.

Ключевые слова: циркон, Приморский разлом, разрушение, статистика Колмогорова – Смирнова, логнормальное распределение, бутстрэп.

Для цитирования: Чинкин В.Е., Остапчук А.А. Фрагментация цирконов в зоне интенсивных тектонических деформаций // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 2. С. 36–44. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_36

Введение

Современное развитие наук о Земле в значительной мере связано с разработкой и применением структурных моделей геологических объектов, моделей их деформирования и разрушения. Структурные модели требуются для описания пространственно-временных особенностей сейсмичности, описания эволюции очага землетрясения, для проектирования подземных и наземных сооружений [Sibson, 2003; Кочарян, Спивак, 2003]. Любой механический процесс в твердой Земле как естественный, так и техногенный связан с деформированием земной коры и охватывает масштабы от дефектов кристаллической решетки (10^{-8} м) до крупных тектонических разломов (10^7 м). В приповерхностной зоне земной коры на глубинах до 10–15 км, где порода находится в хрупком состоянии, деформирование сопровождается образованием трещин, измельчением и раздавливанием породы, фрикционным износом в результате трения перемещающихся поверхностей [Кочарян, 2016].

Анализ микроструктуры шлифов образцов горных пород показал, что интенсивные сдвиговые деформации локализуются в узкой зоне, в которой отчетливо прослеживаются признаки динамического воздействия на минералы в процессе тектонического проскальзывания [Остапчук и др., 2017; Ostapchuk et al., 2017]. Проведенные исследования показали, что циркон может рассматриваться как маркер интенсивных тектонических деформаций в том смысле, что разрушение циркона возможно только при наиболее интенсивных воздействиях. При этом, обладая высокой твердостью и стойкостью к химическому воздействию, цирконы сохраняют свою структурную нарушенность на протяжении длительных периодов времени, позволяя, тем самым, проследить закономерности накопления структурных нарушений при множественных актах тектонического воздействия.

Важным аспектом изучения процесса разрушения горных пород на различных масштабах является выбор механических моделей, определяющих распределение числа фрагментов породы $n(x, t)$ по

условным размерам x во времени t . Процесс разрушения объектов определяется из кинетического уравнения [Fowler, Scheu, 2016]. Однако еще до теоретического описания кинетического уравнения было показано, что при выполнении двух условий: (1) вероятность разрушения любого фрагмента в течение всего процесса разрушения постоянна, не зависит от его размера и присутствия других фрагментов; (2) распределение долей фрагментов, получаемых при единственном разрушении, не зависит от размера исходного фрагмента; любое распределение с течением времени асимптотически стремится к логнормальному распределению [Epstein, 1947]. При выполнении только условия 2, но при различной скорости разрушения для различных размеров фрагментов распределение фрагментов подчиняется обобщенному гамма-распределению [Peterson et al., 1985], которое в частном случае описывает широко используемый в теории разрушения эмпирический закон Розина – Раммлера [Rosin, Rammler, 1933].

В механике разломообразования широкое распространение имеет модель ограниченного измельчения [Sammis et al., 1987, 2007]. В модели предполагается, что на механическое разрушение зерен влияют только их ближайшие соседи, что приводит к самоподобному распределению фрагментов на различных масштабах и степенному закону распределения.

Проблема выбора модели разрушения на разных масштабных уровнях не теряет актуальность. В работе [Phillips, Williams, 2021] для масштабов от 10^{-6} до 10^{-3} м было получено: при первоначальной гипотезе степенного распределения размеров разрушенных зерен логнормальная модель наилучшим образом описывает данные. Однако в работах [Goodwin et al., 2023; Ord et al., 2022] отвергают логнормальную модель и приходят к выводу, что для описания процессов лучше подходит обобщенная гамма-функция и ее частные случаи, в том числе распределение Вейбулла.

В данной работе впервые исследуются закономерности разрушения цирконов, которые, обладая высокой твердостью и стойкостью к химическому воздействию, позволяют исследовать влияние многократных интенсивных тектонических воздействий в результате многократных косейсмических актов проскальзывания по разлому. Целью настоящей работы является проверка моделей разрушения горных пород на масштабах 1–100 мкм.

Объект исследования

Объектом исследования выступал Приморский разлом Байкальской рифтовой зоны (рис. 1). Приморский разлом протягивается на 250 км от поселка Бугульдейка до поселка Зама и выражен

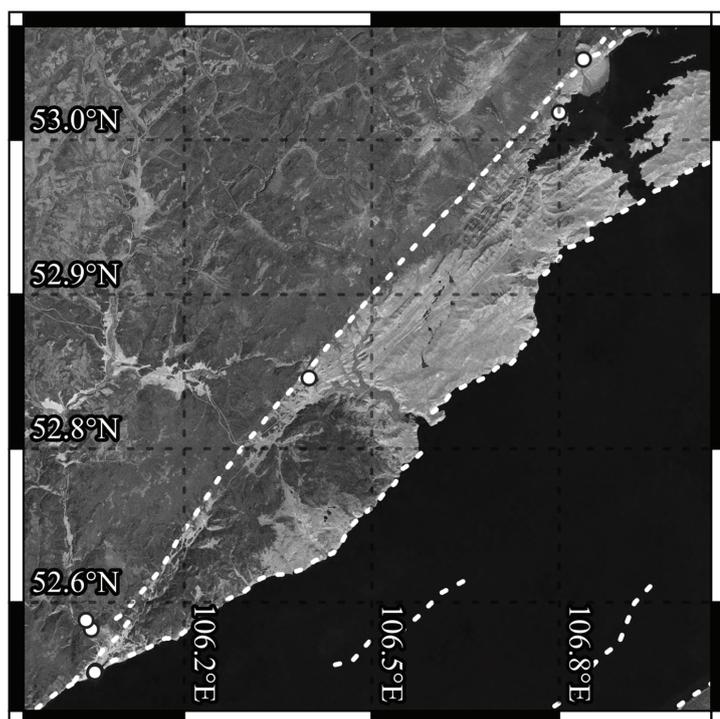


Рис. 1. Карта области проведения исследования Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны. Пунктирными линиями отмечены активные разломы согласно «Цифровой карте активных разломов Евразии» [Zelenin et al., 2022]. Точками отмечены места отбора образцов, содержащих исследуемые цирконы

уступом в рельефе с перепадом высот до 600 м. Приморский разлом имеет древнее заложение и на ранних этапах своего развития формировался как сдвиго-взброс. Кинематический тип этого разлома на неотектоническом этапе развития региона большинством исследователей трактуется как сброс с незначительной сдвиговой компонентой [Черемных, 2015]. В настоящее время вследствие длительной денудации на дневную поверхность подняты горизонты земной коры с глубины 10–15 км [Ruzhich et al., 2024], которые доступны для визуального геологического изучения.

В данной работе исследовались кристаллы цирконов, отобранные из образцов горных пород, слагающих осевую зону Приморского разлома (рис. 1). В ходе камеральных работ было отобрано 65 цирконов. Характерный размер зерен цирконов составляет от 20 до 300 мкм. Среди отобранных зерен есть как ненарушенные кристаллы, так и подверженные сильному динамическому воздействию (рис. 2). При этом, если ненарушенные зерна характеризуют преимущественно вмещающие и слабдеформированные породы, то цирконы, испытавшие хрупкое разрушение, характеризуют только узкие зоны локализации интенсивных сдвиговых деформаций, в которых отчетливо прослеживаются признаки динамо-метаморфических преобразований горных пород [Гридин и др., 2023]. Для детального статистического анализа в дальнейшем были рассмотрены только цирконы, которые разрушены на более чем 20 осколков.

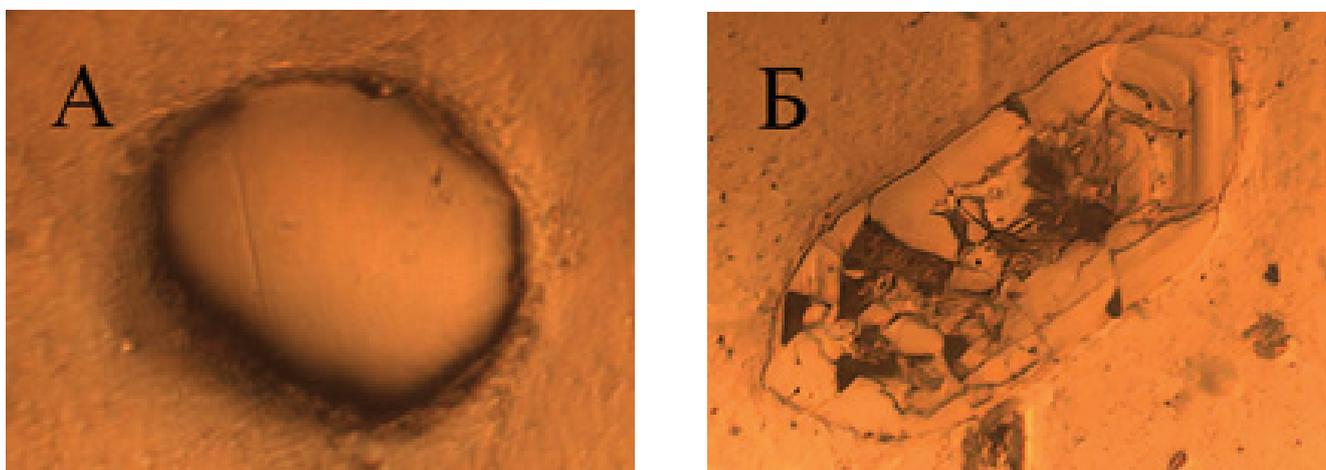


Рис. 2. Примеры фотографий цирконов (характерный размер цирконов 100 мкм): А – ненарушенный циркон, Б – циркон, испытавший многократное интенсивное воздействие

Сегментация изображений цирконов

В качестве исходных данных для проведения анализа использовались микрофотографии кристаллов цирконов, выполненные в режимах обратноотраженных электронов или катодолюминесценции. Изображения представляли собой трехслойную матрицу, где каждый слой соответствует одному из трех цветов RGB. Низкое разрешение исходных изображений, наличие шумов и требований повышенной точности сегментации изображения из-за малого количества фрагментов цирконов стали основанием для повышения качества изображений. С помощью алгоритма искусственного интеллекта Real-ESRGAN x16 [Wang et al., 2021] было достигнуто повышение качества изображений в 16 раз.

Алгоритм сегментации изображений цирконов содержит 3 основных этапа:
Оценка границ объектов. Для оценки границ использовался алгоритм *RCF*, основанный на нейронной сети VGG16, которая имеет 13 сверхточных слоев и 3 полносвязных, соединенных последовательно [Liu et al., 2019]. В результате применения *RCF* получаются матрицы, размерность которых совпадает с размерностью исходных изображений и значения ячеек варьируются от 0 до 1. Матрицы интерпретируются как карты вероятностей границ. Для выделения границ карты вероятностей бинаризируются по методу Оцу [Otsu, 1979].

Выделение замкнутых областей. При выделении замкнутых областей отдельным объектом считалось все, что находилось внутри области, полностью окруженной ячейками границы, при этом использовался алгоритм Спагетти [Bolelli et al., 2020].

Расширение замкнутых областей. Все объекты расширялись до соприкосновения друг с другом, минимизируя толщину границы до одного пикселя. Расширение выполнялось на основе алгоритма водораздела [Meuer, 1992]. Пример результата сегментации изображения представлен на рис. 3.

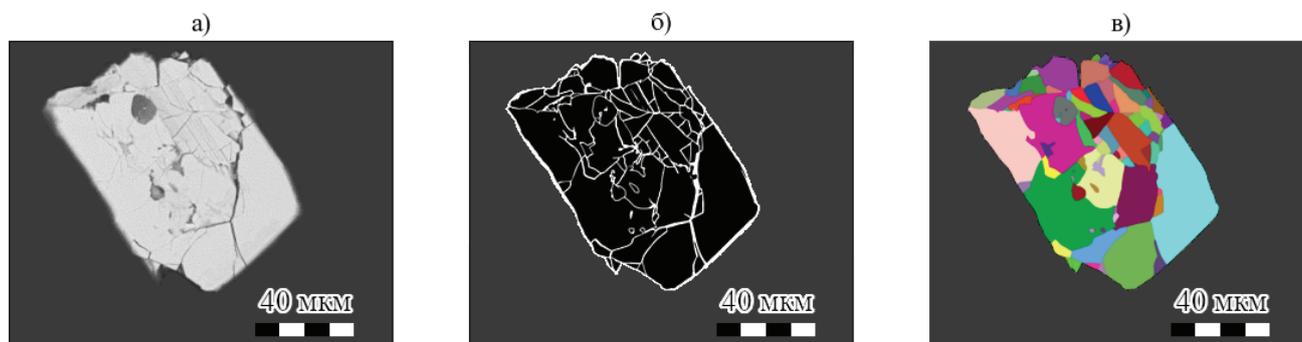


Рис. 3. Этапы процесса сегментации изображения циркона: а – улучшенное Real-ESRGAN исходное изображение в режиме обратнотраженных электронов, б – изображение с выделенными границами сегментов, в – сегментация исходного изображения

Статистические модели фрагментации

В рамках проведенного анализа применялись логнормальное, степенное и экспоненциальное распределения, которые отражают основные анализируемые модели разрушения горных пород. Логнормальное распределение использовалось в форме [Goodwin et al., 2023]:

$$f(s | \mu, \sigma) = \frac{1}{s\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(s) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

Степенное распределение оценивалось по предложенной в [Clauset, 2009] модификации, обеспечивающей сходимость интеграла нормировки возле нуля:

$$f(s | \lambda, \beta) = \begin{cases} C \left(\frac{s}{\lambda}\right)^\beta & , s \geq \lambda \\ C \exp[-\beta(s/\lambda - 1)] & , s < \lambda \end{cases}, \quad (2)$$

где λ – граничное значение, при котором распределение переходит в степенное, C – нормировочный множитель. Эта модификация позволяет проинтегрировать распределение (2) от нуля. Экспоненциальное распределение Вейбулла задавалось согласно соотношению [Goodwin et al., 2023; Ord et al., 2022]:

$$f(s | \lambda, \beta) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{s}{\lambda}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{s}{\lambda}\right)^\beta\right]. \quad (3)$$

Оценка параметров распределения проводилась по методу максимума функции правдоподобия (ММП):

$$\frac{\hat{L}[f]}{N} = \frac{L[f]}{N} - \ln(F(s_{\max}) - F(s_{\min})) \rightarrow \max, \quad (4)$$

где $F(s)$ – кумулятивная функция распределения для соответствующей $f(s)$. \hat{L}, L – скорректированный и стандартный функционалы метода ММП. Функционалы нормированы на число элементов N и имеют поправочное слагаемое на выбранную границу от s_{\min} до s_{\max} . Минимизация проводилась численно по методу Нелдера – Мида [Nelder, Mead, 1965].

Для проверки сложной гипотезы о принадлежности выборки классу выбранных теоретических функций распределения использован непараметрический критерий согласия Колмогорова – Смирнова (К–С). Тест реализован при помощи бутстрэп-метода [Wang et al., 2011]. Бутстрэп-метод использовался при генерации синтетического распределения статистики К – С:

$$D_N(S) = \max_{s_{\min} \leq s \leq s_{\max}} (F_N(s) - F(s|\theta)), \quad (5)$$

где S – выборка площадей s сегментов, а $F_N(s)$ определяет эмпирическую функцию распределения (ЭФР) этой выборки объемом N и $F(s|\theta)$ описывает теоретическую модель этой выборки с набором параметров θ . Поиск распределения статистик К – С выполнялся в несколько этапов:

1. Формировалась линеаризованная ЭФР исходной выборки $F_N(s)$;
2. Методом обратного преобразования линейной ЭФР из $F_N(s)$ генерировался бутстрэп-ансамбль выборок объемом $n = 1000$. Каждая выборка из ансамбля содержит N элементов (ровно столько сколько исходная выборка);
3. Для каждой выборки бутстрэп-ансамбля производилась оценка параметров θ_i теоретических распределений (1)–(3) методом ММП согласно уравнению (5);
4. Для генерации случайных величин из оценок ММП производилась линейная аппроксимация кумулятивных функций распределения $F(s|\theta_i)$ бутстрэп-ансамбля на сетке, совпадающей с соответствующей ей бутстрэп-выборкой;
5. На основе оценок ММП формировался псевдо-ансамбль. Каждая выборка из псевдо-ансамбля состояла из элементов, сгенерированных из соответствующей аппроксимации оценки ММП $F(s|\theta_i)$ бутстрэп-ансамбля по количеству элементов исходной выборки, то есть N .
6. Вычислялось распределение статистик К – С псевдо-ансамбля. Для каждой i -ой выборки псевдо-ансамбля находилась ЭФР $F_{N,i}(s)$, и для каждой из них считалось значение статистик для каждой выборки по формуле (5), используя $F(s|\theta_i)$ в качестве теоретической функции распределения. Набор всех статистик псевдо-ансамбля использовался в качестве распределения К – С и построения доверительного интервала (рис. 4).

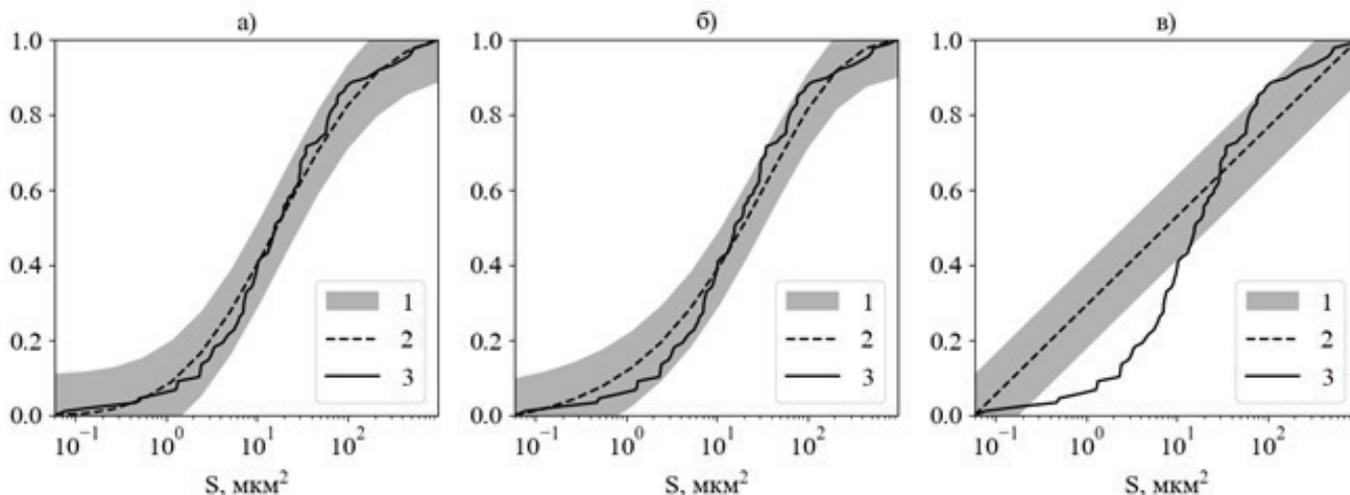


Рис. 4. Распределение сегментов циркона в рамках различных моделей разрушения: а – логнормальная модель, б – экспоненциальная модель, в – степенная модель. 1 – доверительный интервал по уровню значимости $\alpha = 0.25$, 2 – оценка ММП для распределения сегментов, 3 – эмпирическая функция распределения сегментов

На основе полученного синтетического распределения $K - C$ делался вывод о справедливости исходной гипотезы по уровню значимости $\alpha = 0.25$. Для данного набора данных S было вычислено значение статистики $K - C$, где в качестве теоретической функции использовалась оценка ММП. В ходе исследований проверялась гипотеза, принадлежит ли полученная статистика интервалу между 0 и $1-\alpha$ квантилем распределения синтетического распределения $K - C$. Также было определено p -значение выборки, которое рассчитывалось как единица минус значение обратной кумулятивной функции распределения синтетического распределения Колмогорова – Смирнова в точке $1-\alpha$.

Результаты

Для каждой фотографии зерен цирконов проводилась сегментация и проверялась гипотеза о принадлежности распределения выборок сегментов трем выбранным распределениям (1)–(3), соответствующим трем моделям разрушения. Так как в анализе участвуют отдельные зерна, предполагалось, что трещины сквозные, то есть каждому сегменту соответствует масса соответствующего фрагмента, которая пропорциональна площади сегмента. Минимальная s_{\min} и максимальная s_{\max} границы для распределений выбирались как минимальная и максимальная площадь сегментов выборки. Гипотеза проверялась по уровню значимости $\alpha = 0.25$. Результаты проверки справедливости гипотезы представлены в табл. 1. Для соответствующих статистических моделей в графе «Процент» указан процент принятых гипотез о принадлежности, в графе «Медиана» указана медианная величина совокупности p -значений для всех образцов таблицы.

Таблица 1.

Проверка различных статистических моделей распределения сегментов по размерам по уровню значимости $\alpha = 0.25$

Номер циркона	N – число сегментов	Логнормальное распределение		Распределение Вейбулла		Степенное распределение	
		Гипотеза	p -значение	Гипотеза	p -значение	Гипотеза	p -значение
1. (Z–6c)	91	НЕТ	< 0.01	НЕТ	< 0.01	НЕТ	< 0.01
2. (Z–7c)	149	ДА	0.81	ДА	0.32	ДА	0.87
3. (Z–8c)	176	НЕТ	0.14	НЕТ	0.15	ДА	0.46
4. (Z–20e)	148	ДА	0.70	НЕТ	0.07	НЕТ	< 0.01
5. (Z–21e)	24	ДА	0.43	ДА	0.32	ДА	0.25
6. (Z–22e)	89	ДА	0.73	НЕТ	< 0.01	ДА	0.30
7. (Z–23e)	84	ДА	0.93	ДА	0.98	НЕТ	< 0.01
8. (Z–24e)	98	ДА	0.59	НЕТ	0.19	НЕТ	0.02
9. (Z–65e)	77	ДА	0.72	ДА	0.31	НЕТ	0.02
10. (Z–66e)	78	НЕТ	0.24	НЕТ	0.12	НЕТ	< 0.01
		Процент	Медиана	Процент	Медиана	Процент	Медиана
		70%	0.64	40%	0.25	40%	0.015

Можно видеть, что для выбранного уровня значимости ($\alpha = 0.25$) для большинства цирконов (7 из 10) может быть принята гипотеза о логнормальной модели распределения площадей сегментов, а соответственно и масс фрагментов при разрушении. В тоже время для 6 цирконов из 10 для описания распределения площадей сегментов может быть использованы либо экспоненциальная, либо степенная модели. Однако можно видеть, что для логнормальной модели медианное значение p -значения заметно выше. Это указывает на то, что вне зависимости от величины уровня значимости принятие гипотезы о логнормальном распределении наиболее вероятно.

Заключение

Способность цирконов сохранять свою структуру на протяжении длительного периода времени позволяет использовать их не только для определения возраста горных пород, но и для исследования деформационных процессов, протекающих в зонах тектонических разломов. В силу высокой механической и химической устойчивости цирконы восприимчивы только к наиболее интенсивным воздействиям, сопровождающим сейсмогенные подвижки.

Проведенный анализ показал, что статистика площадей сегментов изображений и, следовательно, фрагментов разрушенных зерен цирконов подчиняется логнормальной модели. Следовательно, на масштабах 10^{-6} – 10^{-4} м должны быть использованы модели, которые предполагают, что разрушение минералов горных пород не зависит от их размера и наличия вблизи других минералов.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-77-10087) в части разработки метода сегментации изображений кристаллов цирконов на основе алгоритмов искусственного интеллекта и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900178-7) в части статистического анализа закономерностей разрушения минералов горных пород.

Благодарности

Авторы глубоко признательны сотрудникам лаборатории Деформационных процессов в земной коре ИДГ РАН и лаборатории Тектонофизики ИЗК СО РАН, участвовавшим в сборе фактического материала, использованного при проведении исследования.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Б. А. Иванову за ценные замечания, которые позволили существенно улучшить статью.

Список литературы

- Гридин Г.А., Кочарян Г.Г., Морозова К.Г., Новикова Е.В., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Развитие процесса скопления по гетерогенному разлому. Крупномасштабный лабораторный эксперимент // Физика Земли. 2023. № 3. С. 139–147. <https://doi.org/10.31857/S0002333723030043>
- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС. 2016. – 424 с.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. – 423 с.
- Остапчук А.А., Горбунова Э.М., Ружич В.В., Григорьева А.В., Ефремов В.В. Минералогические и механические свойства пород зоны интенсивных деформаций Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны. В сб.: Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием (Москва, 6–9 июня 2017 г.). 2017. С. 260–266.
- Черемных А.В. Разломы Центрального Прибайкалья: результаты структурно-парагенетического анализа // Вестник Санкт-Петербургского университета: Серия 7. Геология. География. 2015. Вып. 2. С. 59–72.
- Bolelli F., Allegretti S., Baraldi L., Grana C. Spaghetti Labeling: Directed Acyclic Graphs for Block-Based Connected Components Labeling // IEEE Trans. on Image Process. 2020. V. 29. P. 1999–2012. <https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2946979>
- Clauset A., Shalizi C.R., Newman M.E.J. Power-Law Distributions in Empirical Data // SIAM Review. Society for Industrial & Applied Mathematics. 2009. Vol. 51. P. 661–703. <https://doi.org/10.1137/070710111>
- Epstein B. The mathematical description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmico-normal distribution // Journal of the Franklin Institute. 1947. Vol. 6. P. 471–477. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(47\)90465-1](https://doi.org/10.1016/0016-0032(47)90465-1)
- Fowler A.C., Scheu B. A theoretical explanation of grain size distributions in explosive rock fragmentation: Proc. R. Soc. 2016. A 472: 20150843. <https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0843>
- Goodwin A., Tartèse R., Garwood R.J., Almeida N.V. 3D Petrofabric Examination of Martian Breccia NWA 11220 via X-Ray Computed Microtomography: Evidence for an Impact Lithology // Journal of Geophysical Research: Planets. 2023. Vol. 128. P. e2023JE007916. <https://doi.org/10.1029/2023JE007916>

- Liu Y., Cheng M.-M., Hu X., Wang K., Bai X. Richer Convolutional Features for Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2019. Vol. 41. P. 1939–1946. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2878849>
- Meyer F. Color image segmentation: International conference on image processing and its applications. 1992. P. 303–306.
- Nelder J.A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // The Computer Journal. 1965. Vol. 7. P. 308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.
- Ord A., Blenkinsop T., Hobbs B. Fragment size distributions in brittle deformed rocks // Journal of Structural Geology. 2022. Vol. 154. P. 104496. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104496>
- Ostapchuk A.A., Kocharyan G.G., Pavlov D.V., Kabychenko N.V. Fault shear stiffness as the key parameter determining fault behavior: AIP Conference Proceedings. Vol. 1901. P. 020161. 2017. <https://doi.org/10.1063/1.5013842>
- Otsu N.A. Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 1979. Vol. 9. N. 1. P. 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.
- Peterson T.W., Scotto M.V., Sarofim A.F. Comparison of comminution data with analytical solutions of the fragmentation equation // Powder Technology. 1985. Vol. 1. P. 87–93. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(85\)85065-8](https://doi.org/10.1016/0032-5910(85)85065-8)
- Phillips N.J., Williams R.T. To D or not to D? Re-evaluating particle-size distributions in natural and experimental fault rocks // Earth and Planetary Science Letters. 2021. Vol. 553. P. 116635. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116635>
- Rosin P., Rammler E. The law governing the fineness of powdered coal // Journal Inst. Fuel, 1933. Vol. 7. P. 29–36.
- Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A. et al. Different-Scale Heterogeneities in Segments of Active Faults and Their Influence on Slip Modes. Phys Mesomech. 2024. Vol. 27. P. 217–228. <https://doi.org/10.1134/S1029959924030019>
- Sammis C.G., King G.C.P. Mechanical origin of power law scaling in fault zone rock // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34 (4). <https://doi.org/10.1029/2006GL028548>
- Sammis C., King G., Biegel R. The kinematics of gouge deformation // PAGEOPH. 1987. Vol. 5. P. 777–812. <https://doi.org/10.1007/BF00878033>
- Sibson R.H. Thickness of the Seismic Slip Zone // Bulletin of the Seismological Society of America. 2003. Vol. 3. P. 1169–1178. <https://doi.org/10.1785/0120020061>
- Wang C., Zeng B., Shao J. Application of bootstrap method in Kolmogorov-Smirnov test: International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. 2011. <https://doi.org/10.1109/ICQR2MSE.2011.5976614>
- Wang X., Xie L., Dong C., Shan Y. Real-ESRGAN: Training Real-World Blind Super-Resolution with Pure Synthetic Data: IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW). 2021. <https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.0021>
- Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S., Trifonov V., Kozhurin A. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth Syst. Sci. Data. 2022. Vol. 10. P. 4489–4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>

FRAGMENTATION OF ZIRCONS IN THE ZONE OF INTENSE TECTONIC DEFORMATIONS

© 2024 V. E. Chinkin*, A. A. Ostapchuk

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: chinkin.ve@idg.ras.ru*

In the present work are investigated the features of rock fracture on the scales of $10^{-6} - 10^{-4}$ m in zones of intense tectonic deformations. A statistical analysis of the fragmentation of zircons selected from the central part of the Primorsky fault of the Baikal rift zone has been carried out. Photos of zircon in transmitted light and cathodoluminescence images were considered. The segmentation of zircon images was performed based on artificial intelligence algorithms and expert opinion. Three models power, exponential, and lognormal were selected to describe the statistical properties of zircon fracturing. The analysis, based on Kolmogorov – Smirnov statistics using the bootstrap technique, revealed that the lognormal model is the most effective in describing zircon fragmentation under long-term intense tectonic deformations.

Keywords: zircon, Primorsky fault, breakage, Kolmogorov – Smirnov statistics, lognormal distribution, bootstrap.