

## Сейсмический анализ многомасштабной дискретной системы трещин

*Д. Р. Колюхин<sup>1\*</sup>, М. И. Протасов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука А.А. СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Работа посвящена разработке и исследованию статистической модели дискретной сети трещин на разных пространственных масштабах. Распределение центров трещин является фрактальным множеством которое определяется заданным значением корреляционной фрактальной размерностью  $D_2$ . Длины трещин описываются степенным распределением вероятности с соответствующим значением степенной экспоненты  $\alpha$ . Исследуется возможность оценки этих параметров модели на основе соответствующих сейсмических изображений.

**Ключевые слова:** дискретная система трещин, корреляционная фрактальная размерность, сейсмические изображения

## Seismic Analysis of a Multiscale Discrete Fracture System

*D. R. Kolyukhin<sup>1\*</sup>, M. I. Protasov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\* e-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** The work is devoted to the development and study of a statistical model of a discrete network of cracks at different spatial scales. The distribution of fracture centers is a fractal set, which is determined by a given value of the correlation fractal dimension  $D_2$ . The fracture lengths are described by a power-law probability distribution with the corresponding value of the exponent  $\alpha$ . The possibility to estimate these model parameters based on the corresponding seismic images is investigated.

**Keywords:** discrete fracture system, correlation fractal dimension, seismic images

### ***Введение***

Пространственное положение систем трещин могут существенно влиять на поток жидкости и распространение сейсмических волн в естественных резервуарах [1, 2]. Одним из подходов для моделирования трещиноватых коллекторов является явное описание с использованием дискретных систем трещин (Discrete Fracture Network, DFN). Из-за сложной структуры природных резервуаров и недостатка данных измерений для этого обычно применяется стохастический подход [3].

В работе исследуются статистические характеристики пространственного распределения сечения систем трещин, полученного пересечением с плоскостью обнажения [4]. При этом рассматриваются индивидуальные трещины, что соответствует модели дискретной системы трещин [3]. Таким образом, в двухмерном сечении рассматриваются одномерные сечения трещин (fracture traces). Стоит от-

метить, что разделение систем трещин на индивидуальные трещины является не тривиальной задачей, однако в геологической литературе есть много работ посвященных анализу длин и ориентации трещин [3,5,6].

Для статистического описания длин трещин могут использоваться, например, логнормальное, экспоненциальное или гамма распределение. Однако чаще всего предполагается степенное распределение вероятности [6]. Исследуя процесс разрушения Davy и др. [7] сделали вывод о фрактальном распределении разломов. Анализируя геометрию сети трещин Bourg и др. [4] предложили модель фрактальную модель описания центров трещин. DuBernard и др. [8] исследовали фрактальное распределение трещин в Египте. В [1] фрактальный анализ использовался для кластеризации трещиноватых коллекторов.

Целью представленной работы является численная реализация и исследование многомасштабной статистической модели дискретной системы трещин, описанной в [4]. В частности, изучается возможность оценки параметров модели DFN на основе анализа сейсмических изображений.

### ***Статистическая модель дискретной системы трещин***

Построение реализаций DFN основано на явном статистическом моделировании [3]. Для генерации длин трещин использовалось усеченное степенное распределение, которое описывается плотностью вероятности [4]

$$p(l) \sim l^{-\alpha}, l \in [L_{min}, L_{max}]. \quad (1)$$

Фрактальные множества — это геометрические объекты, которые часто используются для универсального описания физических процессов и структур во многих пространственных масштабах [10]. В частности, в [4, 6] фракталы используются для описания пространственного распределения трещин. При этом пространственное распределение центров трещин характеризуется корреляционной фрактальной размерностью  $D_2$ , которая может быть оценена как [11]

$$C_2(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i < j} \Theta(r - |x_i - x_j|),$$

$$D_2 \approx \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C_2(r)}{\ln r}. \quad (2)$$

Здесь  $N$  — общее количество трещин,  $\mathbf{x}$  — их координаты,  $r$  — расстояние между центрами двух трещин,  $C_2(r)$  — парная корреляционная функция, а  $\Theta(r)$  — функция Хевисайда. Статистические реализации положения центров трещин моделируются итерационным методом, описанным в [12]. В табл. 1 приведены параметры состоящей из трех семейств трещин модели DFN, основанной на данных, опубликованных [4, 6]. По умолчанию эта модель генерировалась в области 200м на 200м.

### ***Построение сейсмических изображений***

Мы изучаем статистические характеристики сейсмических изображений для реализаций моделей DFN. Во избежание трудоемких расчетов по моделированию волновых полей и последующего применения миграционных преобразований предлагается использовать концепцию идеальных сейсмических изобра-

жений. Дадим определение этому понятию. С одной стороны, для получения изображений необходимо по заданному условию визуализации мигрировать рассчитанные данные для исходной модели. Однако, с другой стороны, восстановленная функция изображения представляется следующим образом [13]:

$$Image(\bar{x}) = \iint_{X_{par}(\bar{x})} F(\omega(\bar{p})) d\bar{p} \iint_{R^2} \frac{c_1(\bar{y})}{c_0(\bar{y})} \cdot \exp(i \cdot \bar{p} \cdot (\bar{x} - \bar{y})) d\bar{y}, \quad (3)$$

где  $c = c_1 + c_0$  — скоростная модель, состоящая из гладкой макроскоростной модели  $c_0$  и отражательной способности  $c_1$ , которая отвечает за модельные возмущения, в том числе связанные с трещинами,  $F(\omega(\bar{p}))$  — функция, задающая импульс в источнике в частотной области, а  $X_{par}(\bar{x})$  — область частичного восстановления, определяемая освещённостью, задаваемой системой наблюдения, и частотным диапазоном. Изображение, получаемое по формуле (3), мы и называем идеальным изображением, т.е. изображением, которое может быть получено в идеальных условиях. Это вычислительно дешёвый способ, позволяющий строить изображения для исследования характеристик трещин, извлеченных из сейсмических изображений.

Таблица 1

Параметры статистической модели дискретной системы трещин

Параметр	Семейство 1	Семейство 2	Семейство 3
Плотность трещин (на м <sup>2</sup> )	0.5	0.5	0.5
Ориентация трещин $N(m, \sigma)$ (°)	30, 5	60, 5	345, 5
$\alpha$	2.10	2.10	2.10
$L_{min}, L_{max}$ (М)	0.1, 22.5	0.1, 22.5	0.1, 22.5
$D_2$	1.8	1.8	1.8

### Результаты

В представленной работе сначала исследуется возможность оценки статистических параметров модели в зависимости от размеров области доступной для получения данных. На рис. 1 показаны реализации дискретной системы трещин на разных пространственных масштабах. На каждом масштабе оцениваются параметры  $D_2$  и  $\alpha$ . Результаты этих оценок представлены в табл. 2. При этом рассматриваются только трещины полностью попавшие в область исследования.

На следующем этапе рассматривается модель, построенная из сейсмических изображений исходной модели. В первой части исследуется распределение центров трещин. На рис.2 (слева) показаны распределения центров трещин восстановленных их сейсмических изображений. В табл. 3 приведены статистические оценки корреляционной фрактальной размерности  $D_2$  центров трещин. Доверительный интервал оценки  $\widehat{D}_2$  вычислялся методом предложенным в [14].

Таблица 2

Зависимость оценок  $\alpha$  и  $D_2$  от размера области. Истинные параметры модели:  
 $\alpha = 2.1$  и  $D_2 = 1.8$

Параметр модели	Размер области (м)					
	200	100	50	25	12.5	6.25
$\hat{\alpha}$	2.11	2.11	2.12	2.1	2.1	2.0
$\widehat{D}_2$	1.76	1.76	1.78	1.78	1.77	1.91

Таблица 3

Оценка корреляционной фрактальной размерности исходной DFN модели и модели построенной по сейсмическим изображениям

Истинное значение $D_2$	Оценка $\widehat{D}_2$ для исходной модели	Оценка $\widehat{D}_2$ для модели построенной по сейсмическим изображениям
1.8	1.76	2.09, (1.75, 2.4)

Для сравнения выполнена оценка  $D_2$  в случае, когда количество трещин в исходной модели увеличено в 10 раз. В этом случае  $D_2=2$  и в силу увеличения количества трещин в модели, полученной в результате сейсмического анализа, соответствующий доверительный интервал уменьшается до (1.94, 2.07).

Также работе исследуется распределение длин трещин, восстановленных из сейсмических изображений. Сделан вывод, что эта процедура не сохраняет исходную плотность вероятности, соответствующую степенному распределению (Рис. 2, справа).

### Заключение

В работе была исследована статистическая модель системы трещин, предложенная в [4, 12]. Сравнительный анализ оценок корреляционной фрактальной размерности  $D_2$  и показателя степени  $\alpha$  в распределении длин трещин с исходными параметрами модели для разных пространственных масштабов показали, что параметры модели устойчиво восстанавливаются при уменьшении линейного размера исследуемой области более чем на порядок (табл. 2).

Также были проанализированы сейсмические изображения соответствующие реализации DFN. Оценки параметров модели сравнивались исходными параметрами. В результате, сделан вывод, что длины построенных таким образом трещин не удовлетворяют степенному распределению вероятности. Также не воспроизводится фрактальное распределение центров трещин. Центры трещин, полученных в результате анализа сейсмических изображений не кластеризуются. Их распределение является равномерным и не воспроизводит соответствующее распределение исходной модели.

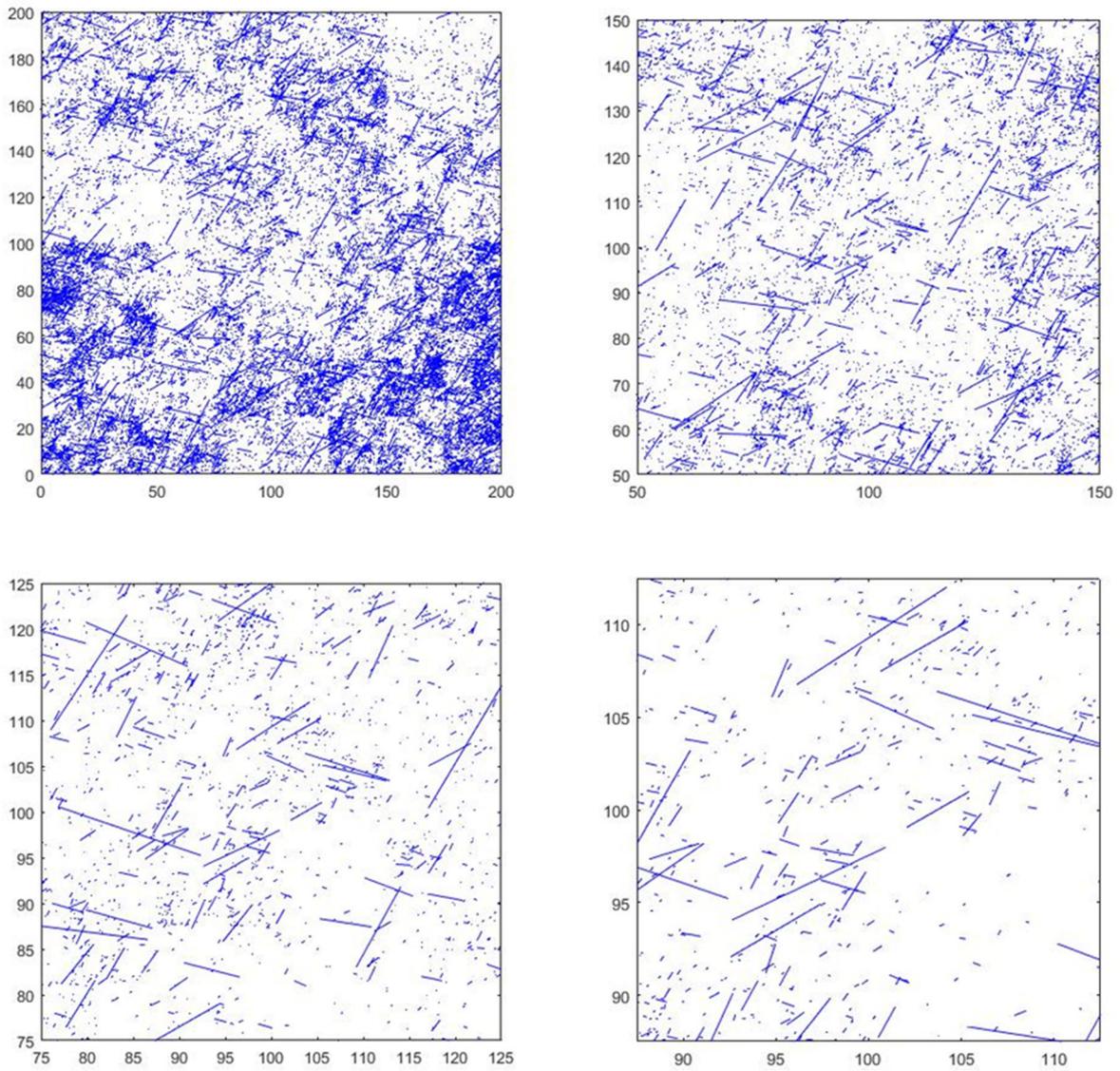


Рис. 1. Дискретная система трещин на разных пространственных масштабах

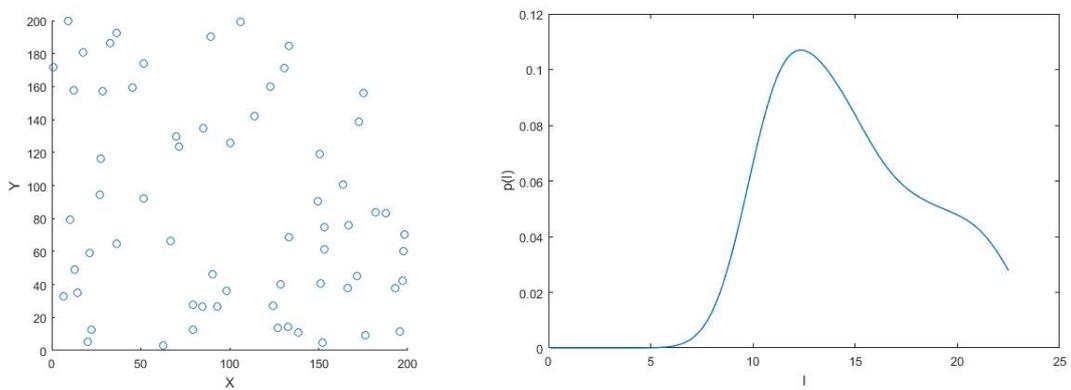


Рис. 2. Распределение центров и эмпирическая функция плотности вероятности длин для трещин, восстановленных из сейсмических изображений.

## *Благодарности*

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант 21-71-20002).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hunziker J., Favino M., Caspari E., Quintal B., Rubino J.G., Krause R., Holliger K. Seismic Attenuation and Stiffness Modulus Dispersion in Porous Rocks Containing Stochastic Fracture Networks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – Т. 123. – №3.
2. Wenli Y., Sharifzadeh M., Yang Z., Xu G., Fang Z. Assessment of fracture characteristics controlling fluid flow performance in discrete fracture networks (DFN) // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Т. 178. – С. 1104-1111.
3. Xu C., Dowd P. A new computer code for discrete fracture network modelling // *Computers and Geosciences*. – 2010. – Т. 36. – № 3. – С. 292-301.
4. Bour O., Davy P., Darcel C., Odling N. A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway) // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – 107:B6.
5. Bahat D. Jointing and fracture interactions in Middle Eocene chalks near Beer Sheva, Israel // *Tectonophysics*. 1987. 136. С. 299–321.
6. Bonnet E., Bour O., Odling N.E., Davy P., Main I., Cowie P., Berkowitz B. Scaling of fracture systems in geological media // *Rev Geophys*. – 2001. – Т. 39. – №3. – С. 347–383.
7. Davy P., Sornette A., Sornette D. Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting // *Nature*. – 1990. – 348(6296). – С. 56–58.
8. Du Bernard X., Labaume P., Darcel C., Davy P., Bour O. Cataclastic slip band distribution in normal fault damage zones, Nubian sandstones, Suez rift // *J Geophys Res*. – 2002. – 107:B7.
9. Масюков В.В., Харахинов В.В. Новый подход к кластеризации трещинных коллекторов углеводородов на основе данных 3D сейсморазведки // *Технологии сейсморазведки*. – 2015. – № 2. – С. 29–35.
10. Turcotte D. L. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, New York: Cambridge Univ. Press, 1992. – 222 с.
11. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 1983. – Т. 9. – № 1-2. – С. 189–208.
12. Darcel C., Bour O., Davy P., de Dreuzay J.R. Connectivity properties of two-dimensional fracture network with stochastic fractal correlation // *Water Resources Research*. – 2003. – Т. 39 – №10. – SBH 1-13.
13. Protasov M., Tcheverda V. True amplitude imaging by inverse generalized Radon transform based on Gaussian beam decomposition of the acoustic Green's function // *Geophysical Prospecting*. – 2011. – Т. 59. – № 2. – С. 197–209.
14. Kolyukhin D. Study the accuracy of the correlation fractal dimension estimation // *Communication in Statistics - Simulation and Computation*. – 2021. Published online: 14 Dec 2021.

© Д. Р. Колюхин, М. И. Протасов, 2022