

УДК 550.347.097

doi 10.26089/NumMet.v19r326

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕЩИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Д. Р. Колюхин<sup>1</sup>, М. И. Протасов<sup>2</sup>

Статья посвящена моделированию трещиноватых резервуаров. Построена трехмерная статистическая модель дискретной системы трещин. Предложен эффективный метод генерирования случайных реализаций статистической модели для произвольной расчетной сетки. Решена задача масштабирования модели трещин с использованием анализа сейсмических изображений статистической модели для различных значений шага сетки.

**Ключевые слова:** дискретная система трещин, статистическое моделирование, сейсмические изображения.

**1. Введение.** Разломы и трещины могут существенно влиять на процессы фильтрации в резервуарах. В этой связи анализ их пространственной структуры и ее моделирование имеет первостепенную важность при планировании разработки и эксплуатации нефтегазовых резервуаров. Как правило, измерение геометрических характеристик систем трещин сопровождается серьезными погрешностями и ограничениями [7], поэтому для их описания обычно используется статистический подход. Статистическому анализу распределения размеров и связности системы трещин посвящены, например, работы [3, 8]. Связь между значениями длин трещин и их пространственным положением изучалась в [5]. В [2, 4] система трещин рассматривалась как множество с мультифрактальным распределением. Влияние геометрии сети трещин на флюидопотоки в резервуарах обсуждаются, например, в [9].

Основные существующие на сегодняшний день подходы для статистического моделирования систем трещин описаны в [13, 16]. Явное статистическое моделирование сети трещин и оценка проницаемости среды были выполнены, например, в [10, 11, 16].

В представленной статье разработан алгоритм статистического моделирования сети трещин в сейсмическом масштабе с заданными параметрами распределения. Для моделирования использовалась концепция дискретной сети трещин (Discrete Fracture Network), которая требует явного задания пространственного положения, размеров и ориентации каждой трещины [16]. Для того чтобы модель в сейсмическом масштабе можно было рассчитать на сетке с разумными размерами и за приемлемое время, предложен эффективный метод генерирования случайных реализаций статистической модели и использовано эффективное решение задачи масштабирования на основе анализа сейсмических изображений.

### 2. Статистическое моделирование системы трещин.

**2.1. Общая схема моделирования.** В нашей работе использована общая схема статистического моделирования системы трещин, описанная в [16]. Этот подход позволяет корректно воспроизвести пространственное распределение плотности количества трещин, а также распределение их размеров и ориентации. Трещины представляются в виде эллипсоидов, центры которых распределены в трехмерной расчетной области  $\Omega = \{[0, L_x] \times [0, L_y] \times [0, L_z]\}$ . Предполагается, что центры распределены случайно, равномерно и независимо друг от друга.

**2.1.1. Пространственные размеры трещин.** Геометрические размеры трещины полностью определяются размерами трех главных осей  $L$ ,  $W$ ,  $T$ . Следуя [16], большая ось (длина трещины)  $L$  моделируется статистически. Для моделирования  $L$  предлагается рассматривать, например, равномерное, экспоненциальное и логнормальное распределения вероятности.

Следуя [6], в представленной статье для моделирования  $L$  мы используем логнормальное распределение вероятности  $\ln N(\mu, \sigma^2)$  с математическим ожиданием  $\mu$  и дисперсией  $\sigma^2$ :

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu)^2 / (2\sigma^2)}.$$

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, просп. Коптюга, 3, 630090, Новосибирск; ст. науч. сотр., e-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, просп. Коптюга, 3, 630090, Новосибирск; ст. науч. сотр., e-mail: ProtasovMI@ipgg.sbras.ru

Значение средней оси (ширина трещины)  $W$  определяется из смоделированной длины трещины  $L$  с помощью задания статистического распределения  $L/W$ . В данной работе это отношение задается в виде нормального распределения  $N(\mu, \sigma^2)$ :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}.$$

Значение меньшей оси (толщина трещины)  $T$  задается как константа.

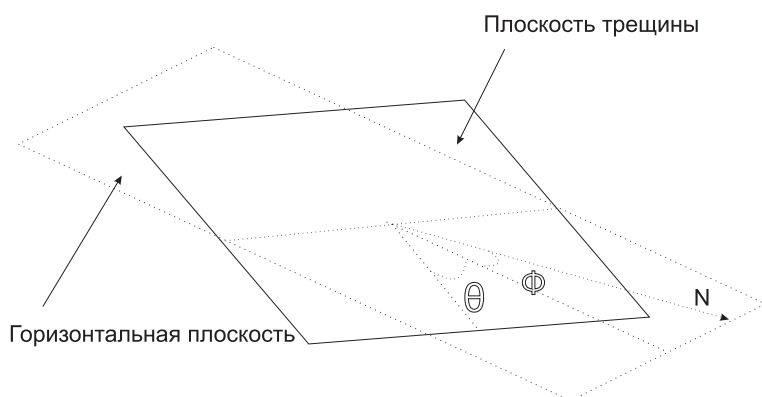


Рис. 1. Ориентация трещины

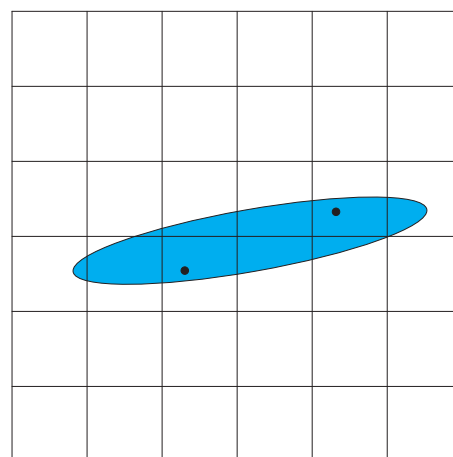


Рис. 2. Статистическое моделирование случайных точек, распределенных равномерно в области трещины

**2.1.2. Ориентация трещин.** Ориентация плоскости определяется направлением нормали, параллельной меньшей оси эллипсоида. Среднее направление плоскости, в которой лежит трещина, определяется величинами углов  $\theta$  (dip angles) и  $\phi$  (dip directions) (рис. 1).

Для всех рассмотренных моделей среднее значение  $\theta$  выбирается равным  $\pi/2$ , т.е. трещины вертикальны. Среднее значение  $\phi$  и дисперсия отклонения от этого направления выбираются отдельно для каждого семейства трещин. В [16] предлагается использовать одно из следующих статистических распределений: равномерное, нормальное, распределение фон Мизеса и распределение Фишера. Следуя [6], в представленной статье для моделирования  $\phi$  мы используем нормальное распределение вероятности  $N(\mu, \sigma^2)$ . Кроме того, задается распределение угла  $\gamma$ , определяющего отклонение направления главной оси эллипсоида трещины от плоскости  $XU$ .

**2.2. Нанесение индикаторной функции сети трещин на произвольную расчетную сетку.**

Следующим после моделирования геометрии системы трещин является нанесение модели на грубую сетку. Для каждой  $k$ -й ячейки крупной сетки вычисляется удельное усредненное значение  $\bar{I}_k$  индикаторной функции

$$I(x) = \begin{cases} 1, & \text{трещина,} \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

которое определяется как отношение объема, занятого трещинами, к общему объему ячейки.

Сложность задачи обусловлена тем, что толщина трещин, как правило, много меньше шага сетки, а также тем, что трещины могут быть не параллельны сетке. Поэтому оценка удельной усредненной индикаторной функции  $\bar{I}$  строится с помощью статистического моделирования. Внутри эллипсоида, которым задается  $j$ -я трещина, в соответствии с равномерным пространственным распределением генерируется  $N_j$  случайных точек (рис. 2).

Для каждой точки определяется номер ячейки  $k = (k_x, k_y, k_z)$ , в которую она попадает. При этом значения  $N_j$  выбираются пропорционально объемам трещин  $V_j = \frac{4}{3} a_j b_j c_j$ , где  $a_j, b_j, c_j$  — значения полуосей эллипсоида  $j$ -й трещины. Общий объем трещин вычисляется по формуле

$$V^{\text{fr}} = \sum_{j=1}^N V_j, \tag{1}$$

где  $N$  — общее количество трещин. Пересечением трещин пренебрегается.

Далее вычисляется удельный вес трещин в каждой ячейке, который определяется как относительная доля объема, заполненного трещинами, в данной ячейке к общему объему трещин, определяемый формулой (1). В итоге для каждой ячейки сетки вычислялось отношение объема, занятого трещинами, к общему объему ячейки:

$$\bar{I}_k = \frac{M^k V^{\text{tr}}}{M V^k},$$

где  $M$  — общее количество сгенерированных случайных точек,  $M^k$  — количество случайных точек, попавших в  $k$ -ю ячейку,  $V^k$  — объем  $k$ -й ячейки.

**2.3. Масштабирование моделей с использованием сейсмических изображений.** Реальные размеры трещин, которые встречаются в природе, в первую очередь на обнажениях и на образцах керна, таковы, что толщина является очень маленькой величиной — может составлять десятки доли миллиметра и меньше. Ясно, что для того, чтобы корректно смоделировать такие трещины с помощью описываемого подхода, необходимо иметь достаточно мелкую сетку, а именно: шаг сетки должен быть меньше толщины моделируемых трещин. Однако на таком шаге даже небольшие модели окколоскважинного пространства будут иметь очень большой размер, который невозможно просчитать за приемлемое время, да и во многих случаях этот размер превосходит доступные размеры жестких дисков.

С другой стороны, разрешающая способность сейсмических волн определяется диапазоном частот, в котором проводятся исследования, поэтому минимально необходимый шаг моделирования тоже определяется этим частотным диапазоном. С этой точки зрения разумно построить модель в более крупном масштабе, т.е. на более крупном шаге, чем минимальный размер трещины. Для этого в предыдущем разделе изложен алгоритм моделирования на крупном шаге. Однако в таком случае возникает вопрос: до какого шага в заданном диапазоне частот можно проводить укрупнение? Чтобы ответить на этот вопрос, предлагается построить сейсмические изображения для заданного диапазона частот для ряда моделей с разными шагами. При этом начинать надо с самого мелкого масштаба и укрупнять его до тех пор, пока изображение остается неизменным, но тогда вновь появляется проблема с возможностью сейсмического моделирования на мелком шаге.

Чтобы решить эту проблему, мы предлагаем использовать концепцию идеальных сейсмических изображений. Далее дадим определение этому понятию в двумерном случае (трехмерный аналогичен). Для построения изображений можно использовать условие визуализации [14]

$$\tilde{f}_\beta \approx \int T_{\text{gbp}}^s(x_s; \omega; \alpha, \beta) \cdot T_{\text{gbp}}^r(x_s; \omega; \alpha, \beta) \cdot \varphi(z_r; x_s; \omega) dx_s dz_r d\alpha d\omega,$$

где  $\tilde{f}_\beta$  — восстанавливаемая функция (изображение),  $\varphi(z_r; x_s; \omega)$  — многокомпонентные сейсмические данные,  $T_{\text{gbp}}^s(x_s; \omega; \alpha, \beta)$ ,  $T_{\text{gbp}}^r(x_s; \omega; \alpha, \beta)$  — веса суммирования. Чтобы получить изображения, в этом случае нужно рассчитать данные для модели, что нетривиально, а затем согласно приведенному условию визуализации промигрировать полученные данные. Однако, с другой стороны, восстанавливаемая функция представляется следующим образом [14]:

$$\tilde{f}_\beta(\mathbf{x}) = \iint_{X_{\text{par}}(\mathbf{x})} F(\omega(\mathbf{p})) d\mathbf{p} \iint_V f_\beta(\mathbf{y}) \cdot \exp(i \cdot \mathbf{p} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{y})) d\mathbf{y},$$

где  $\tilde{f}_\beta = \lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2(2\beta) + \nu_0^2 \rho_1 \cos(2\beta)$ ,  $F(\omega(\mathbf{p}))$  — функция, задающая импульс в источнике в частотной области, и  $X_{\text{par}}(\mathbf{x})$  — область частичного восстановления, определяемая доступными углами освещения и частотным диапазоном:

$$X_{\text{par}}(\mathbf{x}) = \left\{ (p_x, p_z) : \omega_1 \leq \frac{V_{0p} \sqrt{p_x^2 + p_y^2}}{2 \cos(\beta)} \leq \omega_2 \right\}; \quad \alpha_1 \leq \arctg \frac{p_x}{p_z} \leq \alpha_2.$$

Иными словами, имея модель, можно получить изображение напрямую, используя прямое преобразование Фурье от функции модели  $\tilde{f}_\beta$  и обратное преобразование Фурье от произведения импульса в источнике с фурье-образом функции модели, которое берется по части спектральной области  $X_{\text{par}}(\mathbf{x})$ . Именно это изображение мы называем идеальным, т.е. то изображение, которое можно получить в идеальных условиях для заданного частотного диапазона и доступных углов освещения, определяемых геометрией системы наблюдения. Именно таким вычислительно недорогим способом предлагается строить изображения для того, чтобы оценить максимально возможный шаг сетки, на которой строится модель, и тем самым решить задачу масштабирования.

### 3. Результаты численного моделирования.

#### 3.1. Моделирование в килогерцовом диапазоне частот.

Представим конкретные результаты моделирования. Модель для сейсмического моделирования в килогерцовом диапазоне частот состоит из двух семейств трещин. В этом диапазоне частот работает акустический каротаж в околоскважинном пространстве. Значения параметров, использованные для этого моделирования, брались из работы [6] и приведены в табл. 1. Случайные координаты центров трещин генерировались независимо и равномерно в расчетной области. Пример реализации статистической модели пространственного распределения системы трещин в сечениях  $XU$  и  $XZ$  показан на рис. 3. Размер трехмерной области  $L_x = 2$  м,  $L_y = 2$  м,  $L_z = 2$  м, шаг сетки  $h_x = 0.005$  м,  $h_y = 0.005$  м,  $h_z = 0.005$  м, количество ячеек  $N_x = 400$ ,  $N_y = 400$ ,  $N_z = 400$ .

Таблица 1

Параметры модели в килогерцовом диапазоне частот

	1-е семейство трещин	2-е семейство трещин
Плотность (кол-во/м <sup>3</sup> )	50	125
$L$ (м) ( $\mu, \sigma^2$ )	0.8, 0.2	0.6, 0.15
$L/W$ ( $\mu, \sigma^2$ )	4, 0.75	3, 0.5
$T$ (м)	0.0001	0.0005
Ориентация $\phi$ ( $^\circ$ ) ( $\mu, \sigma^2$ )	30, 5	60, 10

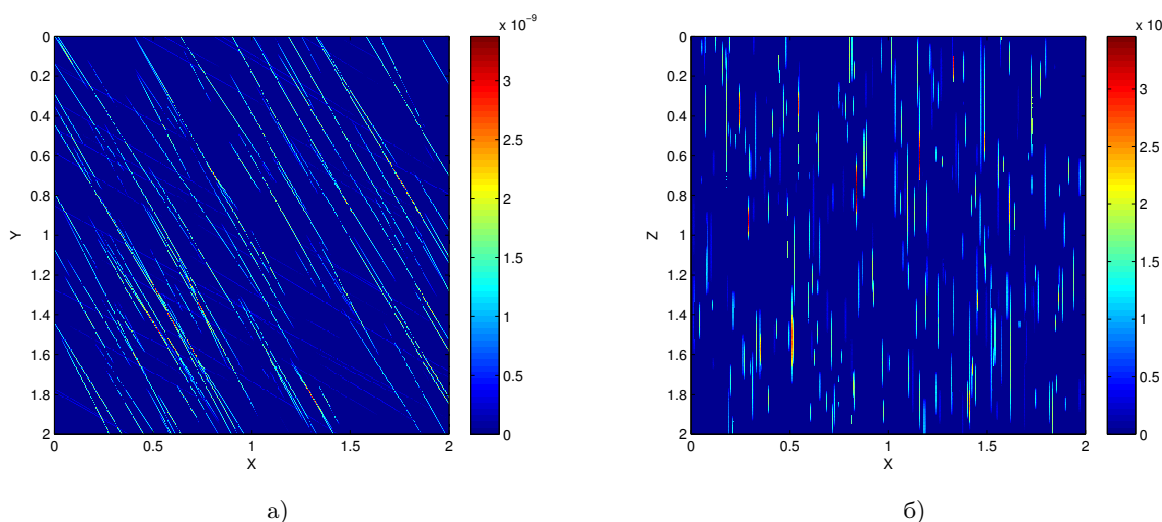
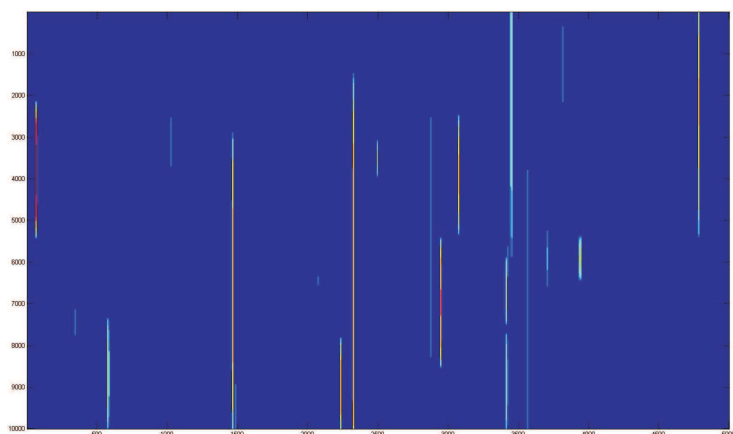


Рис. 3. Пример реализации статистической модели: а) в сечении  $XU$ , б) в сечении  $XZ$

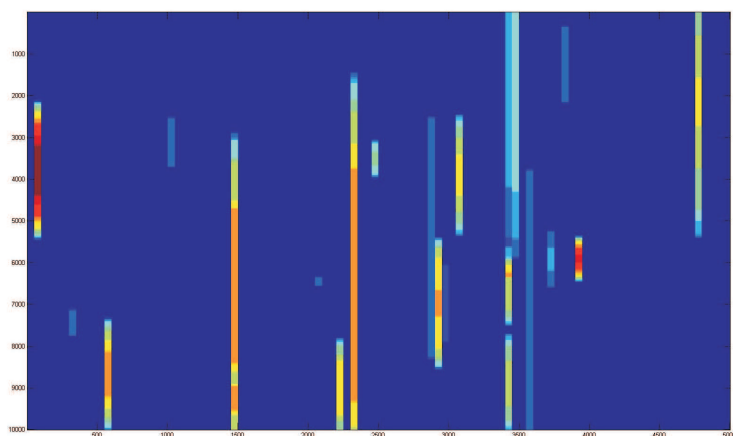
Для того чтобы остановиться на разумном шаге моделирования, был проведен анализ идеальных сейсмических изображений, описанных в предыдущем разделе. Для этого строится двумерная модель системы трещин с параметрами из табл. 1 в плоскости  $XZ$  и с размером  $0.5$  м на  $1$  м. Распределение  $\gamma$  выбирается равномерным в интервале от  $0$  до  $2\pi$ . Наименьший шаг сетки исходной модели равен  $0.1$  мм. Эта модель усредняется на сетках с размерами шага  $0.5$  мм,  $1$  мм,  $5$  мм и  $10$  мм. Исходные модели пространственного распределения системы трещин показаны на рис. 4. Видно, что модель значительно меняется при укрупнении шага. Соответствующие им сейсмические изображения для максимальной частоты  $20$  кГц показаны на рис. 5. В результате сравнения изображений на рис. 5 видно, что изображения не меняются, в то время как шаг модели укрупнился с  $0.1$  мм до  $5$  мм. Это означает, что с точки зрения сейсмических методов, работающих вплоть до  $20$  кГц, эти модели эквивалентны, поэтому мы можем выбрать шаг дискретизации модели равным  $5$  мм.

**3.2. Моделирование в герцовом диапазоне частот.** В данном разделе строится наиболее интересная с точки зрения практики модель дискретной системы трещин — модель трещиноватого резервуара в герцовом диапазоне частот, т.е. в диапазоне частот сейсморазведки, а именно  $1-100$  Гц. Следуя [16], мы используем иерархическую модель, в которой малые трещины кластеризуются в окрестности больших трещин. Например, в [12] описана общая структура разломной зоны в пористых песчаниках, состоящей из полос деформации, кластеризующихся вокруг больших разломов. В частности, этот подход может применяться для моделирования коридоров трещиноватости. На первом этапе моделируется пространственное распределение больших трещин. Далее в окрестности каждой большой трещины моделируются малые трещины.

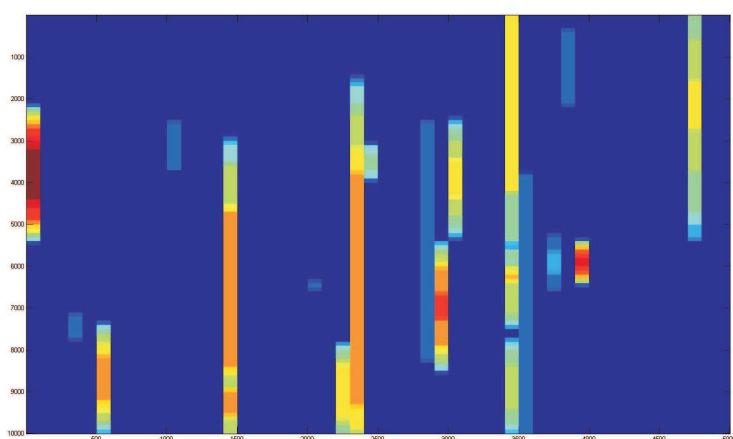
Параметры, определяющие геометрию больших и малых трещин, представлены соответственно в



а)

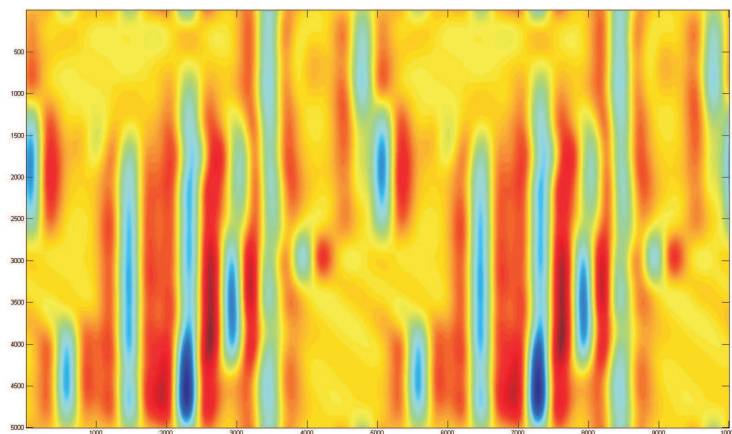


б)

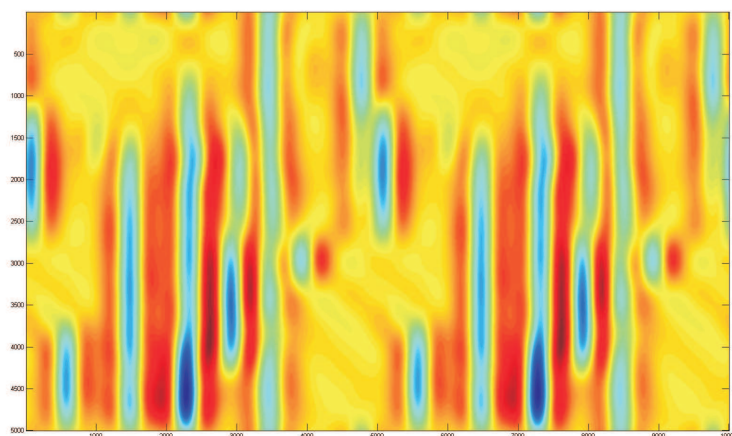


в)

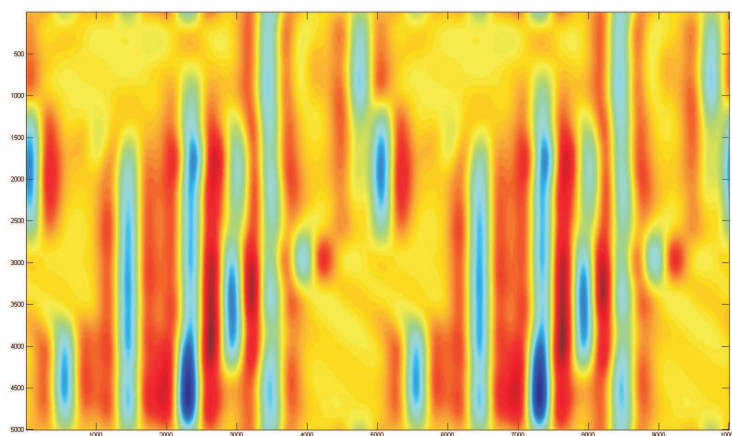
Рис. 4. Исходная модель системы трещин в сечении  $XZ$  для шага сетки  $h_x = h_y = 0.001\text{м}$  (а),  $0.005\text{м}$  (б),  $0.01\text{м}$  (в)



а)



б)



в)

Рис. 5. Сейсмические изображения для шага сетки  $h_x = h_y = 0.001\text{м}$  (а),  $0.005\text{м}$  (б),  $0.01\text{м}$  (в)

табл. 2 и 3. Распределение  $\gamma$  выбиралось нормальным с нулевым средним и стандартным отклонением  $2^\circ$ .

Таблица 2  
Параметры модели для сейсмического моделирования. Большие трещины

	1-е семейство трещин	2-е семейство трещин
Плотность (Кол-во/м <sup>3</sup> )	0.005	0.0125
$L$ (м) $\ln N(\mu, \sigma^2)$	100, 25	75, 20
$L/W$ $N(\mu, \sigma^2)$	4, 0.75	3, 0.5
$T$ (м)	0.0125	0.0625
Ориентация $\phi$ ( $^\circ$ ) $N(\mu, \sigma^2)$	30, 5	60, 10

Таблица 3  
Параметры модели для сейсмического моделирования. Малые трещины

	1-е семейство трещин	2-е семейство трещин
Плотность (Кол-во/м <sup>3</sup> )	5	12.5
$L$ (м) $\ln N(\mu, \sigma^2)$	0.8, 0.2	0.6, 0.15
$L/W$ $N(\mu, \sigma^2)$	4, 0.75	3, 0.5
$T$ (м)	0.0001	0.0005
Ориентация $\phi$ ( $^\circ$ ) $N(\mu, \sigma^2)$	30, 5	60, 10

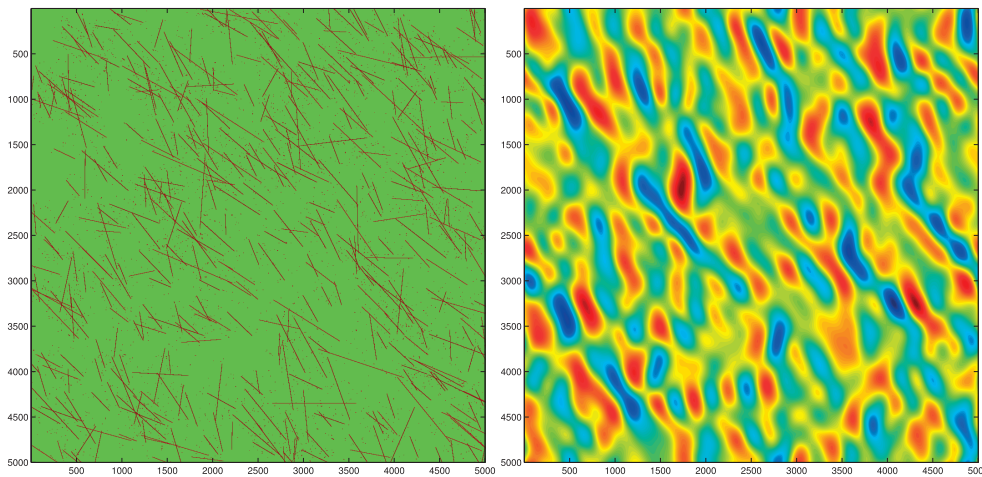


Рис. 6. Модели трещиноватой среды (слева) и соответствующие сейсмические изображения на 30 Гц (справа).  
Усреднение с шагом  $h_x = h_y = 0.5$  м. Коэффициент корреляции представленных изображений с изображением на шаге 0.1 м: 0.9925

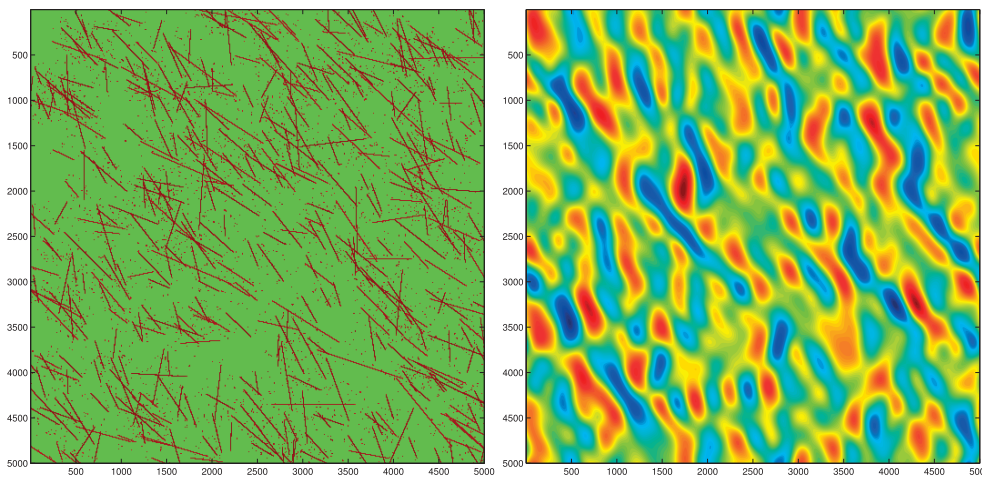


Рис. 7. Модели трещиноватой среды (слева) и соответствующие сейсмические изображения на 30 Гц (справа).  
Усреднение с шагом  $h_x = h_y = 1$  м. Коэффициент корреляции представленных изображений с изображением на шаге 0.1 м: 0.9829

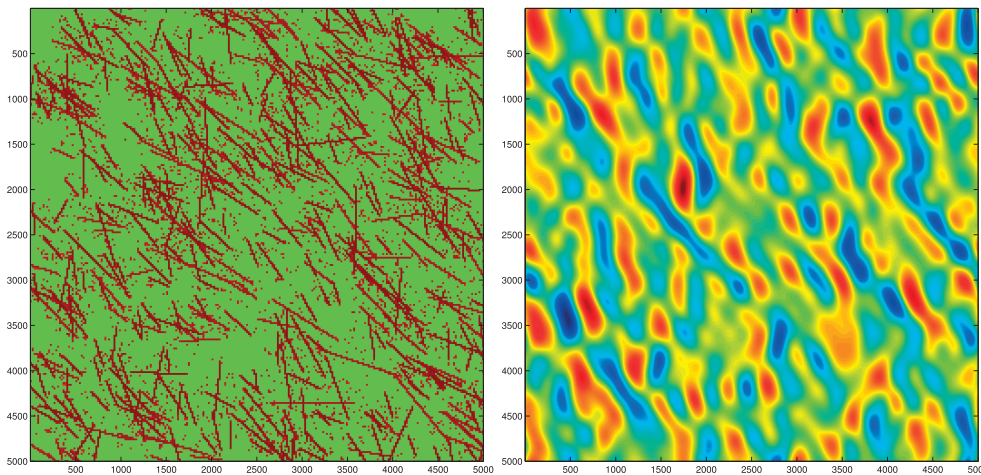


Рис. 8. Модели трещиноватой среды (слева) и соответствующие сейсмические изображения на 30 Гц (справа).  
Усреднение с шагом  $h_x = h_y = 2$  м. Коэффициенты корреляции представленных изображений  
с изображением на шаге 0.1 м: 0.9549

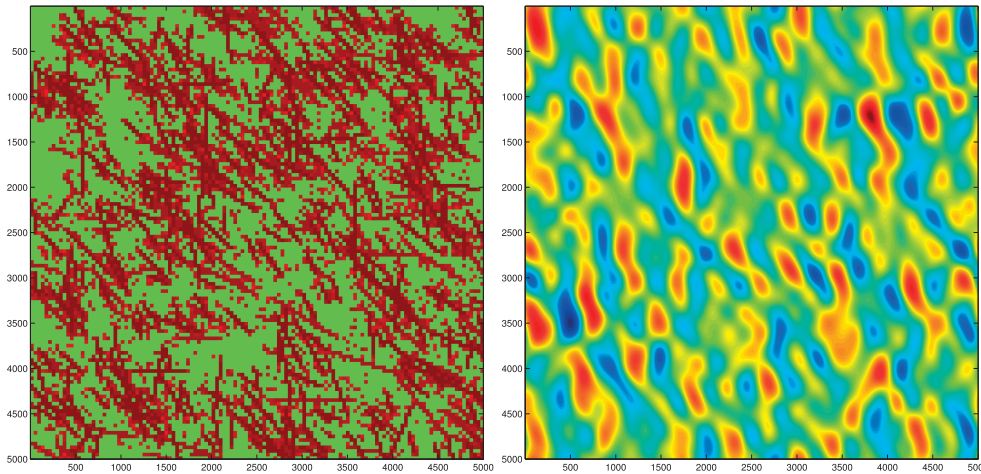


Рис. 9. Модели трещиноватой среды (слева) и соответствующие сейсмические изображения на 30 Гц (справа).  
Усреднение с шагом  $h_x = h_y = 4$  м. Коэффициенты корреляции представленных изображений  
с изображением на шаге 0.1 м: 0.8713

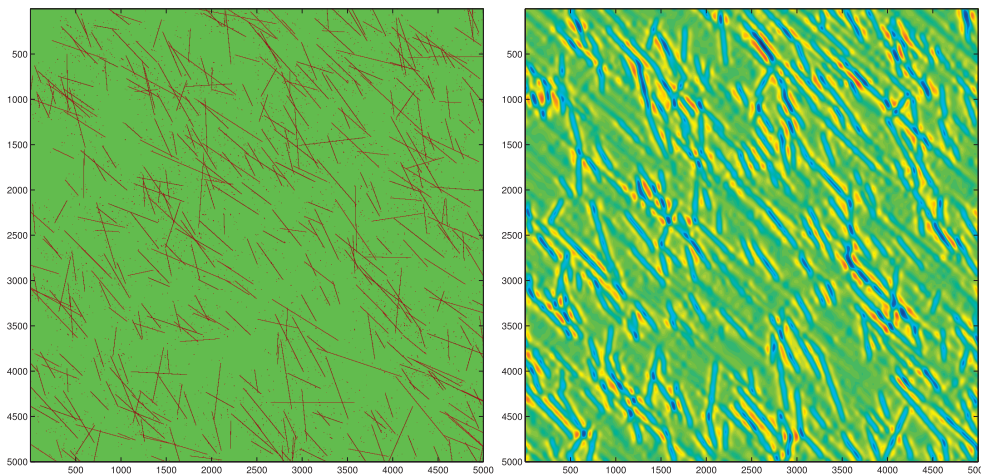


Рис. 10. Модели трещиноватой среды (слева) и соответствующие сейсмические изображения на 100 Гц (справа).  
Усреднение с шагом  $h_x = h_y = 0.5$  м. Коэффициенты корреляции представленных изображений  
с изображением на шаге 0.1 м: 0.9878



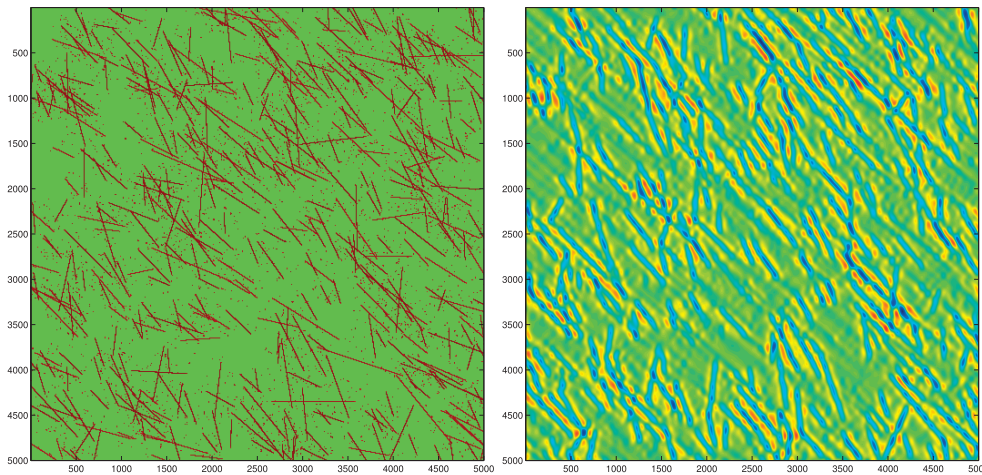


Рис. 11. Модели трещиноватой среды (слева) и соответствующие сейсмические изображения на 100 Гц (справа).  
Усреднение с шагом  $h_x = h_y = 1$  м. Коэффициенты корреляции представленных изображений  
с изображением на шаге 0.1 м: 0.9666

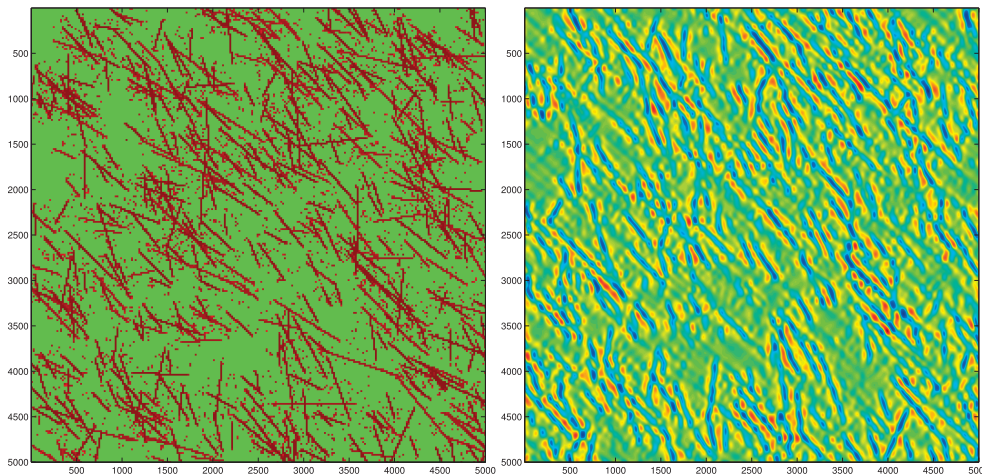


Рис. 12. Модели трещиноватой среды (слева) и соответствующие сейсмические изображения на 100 Гц (справа).  
Усреднение с шагом  $h_x = h_y = 2$  м. Коэффициенты корреляции представленных изображений  
с изображением на шаге 0.1 м: 0.8933

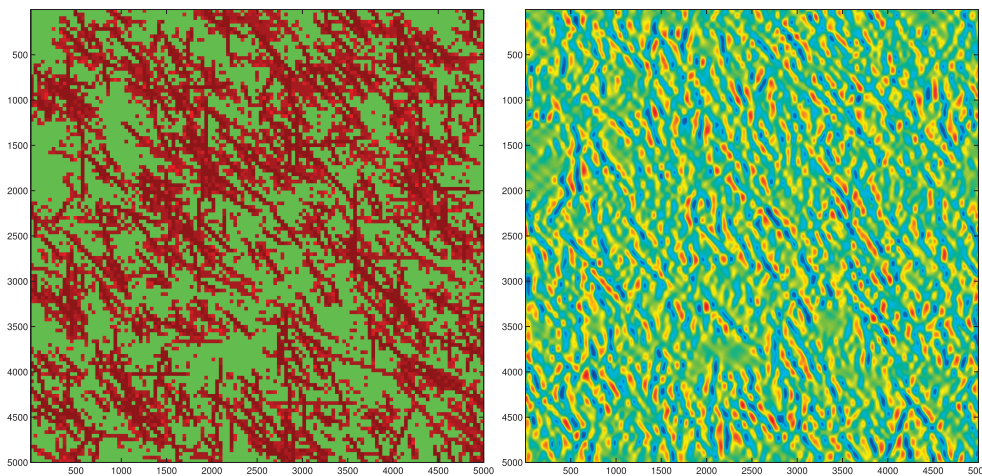


Рис. 13. Модели трещиноватой среды (слева) и соответствующие сейсмические изображения на 100 Гц (справа).  
Усреднение с шагом  $h_x = h_y = 4$  м. Коэффициенты корреляции представленных изображений  
с изображением на шаге 0.1 м: 0.6399

На первом этапе в этой секции для представленной модели трещиноватой среды мы повторяем анализ сейсмических изображений, описанный в предыдущем разделе, и строим идеальные изображения для частот 30 Hz и 100 Hz. Размер двумерной области  $L_x = 500$  м,  $L_y = 500$  м, шаг сетки  $h_x = 0.1$  м,  $h_y = 0.1$  м, количество ячеек  $N_x = 5000$ ,  $N_y = 5000$ . Сравнивая результаты, представленные на рис. 6–13, мы делаем вывод, что для моделирования дискретной системы трещин в рассмотренном диапазоне частот можно использовать шаг сетки 1 м, поскольку видно, что разница между изображениями незначительна до шага 2 м на частоте 30 Гц (соответствует центральной частоте в сейсмическом диапазоне частот) и разница между изображениями мала до шага 1 м на частоте 100 Гц (соответствует максимальной частоте в сейсмическом диапазоне частот). Разницу между изображениями, с одной стороны, можно оценивать визуально. С другой стороны, мы предлагаем использовать количественный критерий, а именно коэффициент корреляции, который приведен в подписях к рисункам. Как визуально, так и по значениям коэффициента корреляции видно, что на более высокой частоте разница между изображениями растет. Шаг 1 м, с одной стороны, соответствует тому, что изображения визуально не меняются вплоть до этого шага, а с другой стороны, коэффициент корреляции при этом не меньше 0.96, т.е. ошибка с точки зрения коэффициента корреляции не превосходит 4%. Этот критерий можно использовать в качестве автоматического, исследовав конкретное значение более детально для ряда моделей.

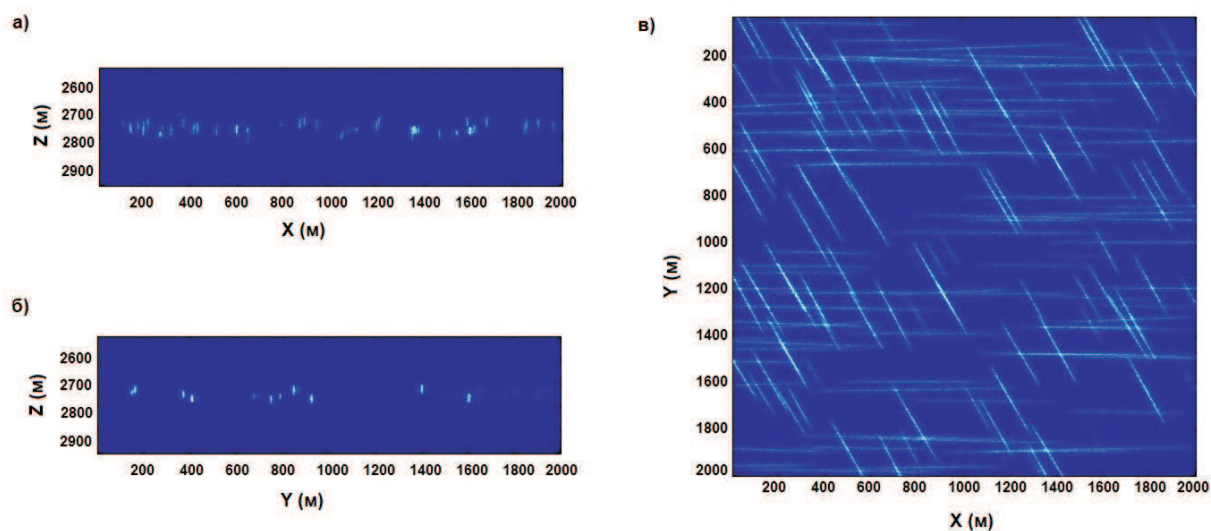


Рис. 14. Индикаторная функция интенсивности трещин после моделирования дискретной сети трещин: а) плоскость XZ; б) плоскость YZ; в) плоскость XY, Z = 2750 м

Результаты описанного выше анализа были использованы для построения итоговой полномасштабной иерархической модели с размером области 2000 м × 2000 м × 500 м, где шаг сетки равен 1 м × 1 м × 1 м. На рис. 14 представлен пример модели с двумя семействами крупных трещин: 80 крупных трещин первого семейства и 120 крупных трещин второго семейства.

**4. Заключение.** В представленной работе реализован алгоритм статистического моделирования дискретной системы трещин. Предложен статистический подход для оценки усредненной индикаторной функции, описывающей удельную долю объема, заполненного трещинами для произвольной расчетной области. Кроме того, предложено решение задачи масштабирования модели трещин с использованием анализа идеальных сейсмических изображений для различных значений шага сетки. Представленные результаты моделирования для практических значений входных параметров демонстрируют возможности применения предложенной методики моделирования реалистичных трещиноватых резервуаров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-05-00001). Авторы признательны рецензенту, чьи комментарии позволили существенно улучшить качество статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982.
2. Bonnet E., Bour O., Odling N.E., Davy P., Main I., Cowie P., Berkowitz B. Scaling of fracture systems in geological media // Reviews of Geophysics. 2001. 39, N 3. 347–383.

3. Bour O., Davy P., Darcel C., Odling N. A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway) // *Journal of Geophysical Research*. 2002. **107**, N B6. ETG 4-1–ETG 4-12
4. Darcel C., Bour O., Davy P., de Dreuzy J.R. Connectivity properties of two-dimensional fracture networks with stochastic fractal correlation // *Water Resources Research*. 2003. **39**, N 10. doi 10.1029/2002WR001628.
5. Darcel C., Bour O., Davy P. Cross-correlation between length and position in real fracture networks // *Geophysical Research Letters*. 2003. **30**, N 12. doi 10.1029/2003GL017174.
6. Long J.C.S., Remer J.S., Wilson C.R., Witherspoon P.A. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures // *Water Resources Research*. 1982. **18**, N 3. 645–658.
7. Manzocchi T., Walsh J.J., Bailey W.R. Population scaling biases in map samples of power-law fault systems // *Journal of Structural Geology*. 2009. **31**, N 12. 1612–1626.
8. Odling N.E. Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway // *Journal of Structural Geology*. 1997. **19**, N 10. 1257–1271.
9. Odling N.E., Gillespie P., Bourgin B., Castaing C., Chiles J.P., Christensen N.P., Fillion E., Genter A., Olsen C., Thrane L., Trice R., Aarseth E., Walsh J.J., Watterson J. Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs // *Petroleum Geoscience*. 1999. **5**, N 4. 373–384.
10. Odling N.E., Harris S.D., Knipe R.J. Permeability scaling properties of fault damage zones in siliclastic rocks // *Journal of Structural Geology*. 2004. **26**, N 9. 1727–1747.
11. Öhman J., Niemi A. Upscaling of fracture hydraulics by means of an oriented correlated stochastic continuum model // *Water Resources Research*. 2003. **39**, N 10. doi 10.1029/2002WR001776.
12. Schueller S., Braathen A., Fossen H., Tveranger J. Spatial distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones: statistical analysis of field data // *Journal of Structural Geology*. 2013. **52**. 148–162.
13. Tran N.H. Simulated annealing technique in discrete fracture network inversion: optimizing the optimization // *Computational Geosciences*. 2007. **11**, N 3. 249–260.
14. Protasov M.I., Tcheverda V.A. True amplitude elastic Gaussian beam imaging of multicomponent walkaway vertical seismic profiling data // *Geophysical Prospecting*. 2012. **60**, N 6. 1030–1042.
15. Tran N.H., Ravoof A. Coupled fluid flow through discrete fracture network: a novel approach // *Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2007. **1**, N 3. 295–299.
16. Xu C., Dowd P. A new computer code for discrete fracture network modelling // *Computers and Geosciences*. 2010. **36**, N 3. 292–301.

Поступила в редакцию  
26.04.2018

---

## Statistical Modeling of Discrete Fracture Networks Using Seismic Images

D. R. Kolyukhin<sup>1</sup> and M. I. Protasov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; prospekt Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090, Russia; Ph.D., Senior Scientist, e-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru*

<sup>2</sup> *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; prospekt Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090, Russia; Ph.D., Senior Scientist, e-mail: ProtasovMI@ipgg.sbras.ru*

Received April 26, 2018

**Abstract.** This paper is devoted to modeling of fractured reservoirs. A three-dimensional statistical model of a discrete fracture network is developed. An efficient method to generate the random realizations of the statistical model for an arbitrary computational grid is proposed. The problem of scaling the fracture model using the analysis of seismic images for different grid steps is solved.

**Keywords:** discrete fracture network, statistical modeling, seismic images.

### References

1. S. M. Ermakov and G. A. Mikhailov, *Statistical Modeling* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
2. E. Bonnet, O. Bour, N. E. Odling, et al., “Scaling of Fracture Systems in Geological Media,” *Rev. Geophys.* **39** (3), 347–383 (2001).

3. O. Bour, P. Davy, C. Darcel, and N. Odling, "A Statistical Scaling Model for Fracture Network Geometry, with Validation on a Multiscale Mapping of a Joint Network (Hornelen Basin, Norway)," *J. Geophys. Res.* **107** (B6), ETG 4-1–ETG 4-12 (2002).
4. C. Darcel, O. Bour, P. Davy, and J. R. de Dreuzy, "Connectivity Properties of Two-Dimensional Fracture Networks with Stochastic Fractal Correlation," *Water Resour. Res.* **39** (2003). doi 10.1029/2002WR001628
5. C. Darcel, O. Bour, and P. Davy, "Cross-Correlation between Length and Position in Real Fracture Networks," *Geophys. Res. Lett.* **30** (2003). doi 10.1029/2003GL017174
6. J. C. S. Long, J. S. Remer, C. R. Wilson, and P. A. Witherspoon, "Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures," *Water Resour. Res.* **18** (3), 645–658 (1982).
7. T. Manzocchi, J. J. Walsh, and W. R. Bailey, "Population Scaling Biases in Map Samples of Power-Law Fault Systems," *J. Struct. Geol.* **31** (12), 1612–1626 (2009).
8. N. E. Odling, "Scaling and connectivity of Joint Systems in Sandstones from Western Norway," *J. Struct. Geol.* **19** (10), 1257–1271 (1997).
9. N. E. Odling, P. Gillespie, B. Bourgine, et al., "Variations in Fracture System Geometry and Their Implications for Fluid Flow in Fractures Hydrocarbon Reservoirs," *Petrol. Geosci.* **5** (4), 373–384 (1999).
10. N. E. Odling, S. D. Harris, and R. J. Knipe, "Permeability Scaling Properties of Fault Damage Zones in Siliclastic Rocks," *J. Struct. Geol.* 2004. **26** (9), 1727–1747 (2004).
11. J. Öhman and A. Niemi, "Upscaling of Fracture Hydraulics by Means of an Oriented Correlated Stochastic Continuum Model," *Water Resour. Res.* **39** (2003). doi 10.1029/2002WR001776
12. S. Schueller, A. Braathen, H. Fossen, and J. Tveranger, "Spatial Distribution of Deformation Bands in Damage Zones of Extensional Faults in Porous Sandstones: Statistical Analysis of Field Data," *J. Struct. Geol.* **52**, 148–162 (2013).
13. N. H. Tran, "Simulated Annealing Technique in Discrete Fracture Network Inversion: Optimizing the Optimization," *Comput. Geosci.* **11** (3), 249–260 (2007).
14. M. I. Protasov and V. A. Tcheverda, "True Amplitude Elastic Gaussian Beam Imaging of Multicomponent Walkaway Vertical Seismic Profiling Data," *Geophys. Prospect.* **60** (6), 1030–1042 (2012).
15. N. H. Tran and A. Ravoof, "Coupled Fluid Flow Through Discrete Fracture Network: A Novel Approach," *J. Math. Comput. Simul.* **1** (3), 295–299 (2007).
16. C. Xu and P. Dowd, "A New Computer Code for Discrete Fracture Network Modelling," *Comput. Geosci.* **36** (3), 292–301 (2010).