# Вычислительная физика горных пород

(грант РНФ 19-77-20004 на проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня» Президентской программы исследовательских проектов)

Роменский Е.И., <u>Лисица В.В.</u>, Чеверда В.А., Решетова Г.В., Базайкин Я.В., Соловьев С.А., Колюхин Д.Р., Хачкова Т.С., Новиков М.А.



- Что такое вычислительная физика горных пород (digital rock physics)?
- Масштаб пор
  - о Оценка репрезентативности объема
  - о Расчет упругих модулей
  - о Расчет удельного сопротивления
  - Расчет абсолютной проницаемости
  - Моделирование химического взаимодействия флюида с породой
- Масштаб керна
  - о Трещиновато-пористые среды wave-induced fluid flows
- Масштаб пласта
  - о Сейсмическое моделирование
  - о Геомеханическое моделирование



- Что такое вычислительная физика горных пород (digital rock physics)?
- Масштаб пор
  - о Оценка репрезентативности объема
  - о Расчет упругих модулей
  - о Расчет удельного сопротивления
  - Расчет абсолютной проницаемости
  - Моделирование химического взаимодействия флюида с породой
- Масштаб керна
  - Трещиновато-пористые среды wave-induced fluid flows
- Масштаб пласта
  - о Сейсмическое моделирование
  - о Геомеханическое моделирование

### Объект исследования -

цифровые изображения образца горной породы на предмет разработки численных алгоритмов оценки её эффективных (усредненных) морфологических, транспортных и упругих параметров.













### Разномасштабность



Макромасштаб до ¼ длины волны (около 10 – 20 м) **Мезомасштаб** 0.01 – 0.1 длины волны

Микромасштаб порядка 1 см

### Объект исследования -

цифровые модели горной породы на разных масштабах на предмет разработки численных методов и алгоритмов для моделирования геофизических полей и оценки эффективных (усредненных) физических параметров геологической среды.





Что такое вычислительная физика горных пород (digital rock physics)?

#### • Масштаб пор

- о Расчет упругих модулей
- о Расчет удельного сопротивления
- Расчет абсолютной проницаемости
- Моделирование химического взаимодействия флюида с породой

#### • Масштаб керна

о Трещиновато-пористые среды – wave-induced fluid flows

#### • Масштаб пласта

- о Сейсмическое моделирование
- о Геомеханическое моделирование

#### Численная оценка эффективных упругих параметров

- репрезентативный объём для такого измерения больше, чем для оценки морфологии порового пространства [Saenger, 2008; Shulakova et al., 2013; Saenger et al., 2016]
- он зависит от контраста упругих параметров зёрен и цемента в модели сцементированной породы [Huet, 1999]
- на результаты оценки существенное влияние оказывают **шероховатость поверхности** зёрен, **геометрия пространства** между ними и **параметры цемента** [Leurer et al., 2006; Madonna et al., 2012; Saenger et al., 2016]

Если учесть все эти требования в одной модели, потребуются огромные вычислительные ресурсы

#### Численная оценка эффективных упругих параметров

 Геостатистическое моделирование для построения модели на масштабе СТ-изображений
 Оценка эффективных упругих параметров горной породы по её цифровым изображениям



КТ-изображения





#### Эффективные упругие параметры горной породы

Эффективные упругие тензоры жёсткости С\*

и податливости **S**\*

 $\bar{\sigma}_{ij} = \mathbf{c}_{ijkl}^* \bar{\varepsilon}_{kl}, \quad \bar{\varepsilon}_{ij} = \mathbf{s}_{ijkl}^* \bar{\sigma}_{kl}$ 

Усреднение по представительному объёму

 $\overline{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_{V} \sigma_{ij} dV$   $\overline{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^{0}$   $\overline{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^{0}$   $\overline{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_{V} \varepsilon_{ij} dV$   $\overline{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_{V} \varepsilon_{ij} dV$   $U = \frac{1}{2} \int_{V} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV = \frac{1}{2} \mathbf{s}_{ijkl}^{*} \sigma_{kl}^{0} \sigma_{ij}^{0} V$ 

Решение серии статических задач

Статическая задача теории упругости

Динамическая задача теории упругости

$$\sigma_{ij,j} = 0$$
  
$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} = c_{ijkl} u_{k,l}$$
  
$$t_i(S) = \sigma_{ij}^0 n_j$$

$$\rho \dot{v}_{i} + \alpha v_{i} = \sigma_{ij,j}$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = c_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} = c_{ijkl} v_{k,l}$$

$$t = 0; \quad v_{i} = 0, \quad \sigma_{ij} = 0$$

$$t_{i}(S) = \sigma_{ij}^{0} n_{j}$$

с диссипативным членом

### Реализация

- 3D domain decomposition;
- Use of Isend, Irecv;
- Use of MPI I/O.



 $\rho \dot{\mathbf{v}}_{i} + \alpha \mathbf{v}_{i} = \sigma_{ij,j}$  $\dot{\sigma}_{ij} = c_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} = c_{ijkl} \mathbf{v}_{k,l}$ 



Верификация алгоритма оценки эффективных упругих параметров на моделях консолидированных пород

Модель однородной изотропной породы

Q = 2700 кг/м <sup>3</sup>		$(\lambda + 2\mu)$	λ	λ	0	0	0)
$V_p = 5600 \text{ M/c}$			$\lambda + 2\mu$	λ	0	0	0
<i>V<sub>s</sub></i> = 2620 м/с	$C^* =$			$\lambda + 2\mu$	0	0 0	0
λ = 47604240000 Πa			sym		μ	μ	0
μ = 18533880000 Па							$\mu$

Точные значения	Вычисленные значения
$c_{1111} = c_{2222} = c_{3333} = 84672000000$	$c_{1111}^* = c_{2222}^* = c_{3333}^* = 84671999914.2$
$\mu = c_{2323} = c_{1313} = c_{1212} = 18533880000$	$\mu = c_{2323}^* = c_{1313}^* = c_{1212}^* = {}_{18533879937.46}$
$\lambda = c_{1122} = c_{1133} = c_{2233} = 47604240000$	$\lambda = c_{1122}^* = c_{1133}^* = c_{2233}^* = 47604239998.42$
$O$ стальные $c_{ijkl} = 0$	Остальные $c^*_{ijkl} pprox 10^{-1}$

$$V_p = 3652$$
 м/с

 $V_{\rm s} = 1784 \, {\rm m/c}$ 

Упругие параметры скелета:  $Q = 2700 \ \kappa \Gamma / M^3$ *V*<sub>p</sub> = 5600 м/с  $V_{\rm s} = 2620 \text{ M/c}$ 

*V<sub>p</sub>* = 3727 м/с

 $V_{\rm s} = 1858 \; {\rm m/c}$ 

#### Модель образца известняка по КТ изображениям

 $\Delta \approx 2\%$ 

 $\Delta \approx 4\%$ 

Верификация алгоритма оценки эффективных упругих параметров на моделях консолидированных пород



512 × 512 × 768 вокселей

разрешение 3.44 мкм на воксель



Что такое вычислительная физика горных пород (digital rock physics)?

#### • Масштаб пор

- о Расчет упругих модулей
- о Расчет удельного сопротивления
- Расчет абсолютной проницаемости
- Моделирование химического взаимодействия флюида с породой

#### • Масштаб керна

о Трещиновато-пористые среды – wave-induced fluid flows

#### • Масштаб пласта

- о Сейсмическое моделирование
- о Геомеханическое моделирование

### Постановка задачи



$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$
$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \nabla \varphi$$

Проводимость флюида  $10^{-2} - 10^{0}$ 

Проводимость минеральной матрицы  $10^{-15} - 10^{-4}$ 

### Граничные условия



 $\nabla \cdot \left( \boldsymbol{\sigma}_{f} \nabla \boldsymbol{\varphi} \right) = \mathbf{0}$ 

$$\varphi(x_1 = x_1^L) = \varphi^L,$$
  

$$\varphi(x_1 = x_1^R) = \varphi^R,$$
  

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_{2,3}}(x_{2,3} = x_{2,3}^{L,R}) = 0$$

### Оценка эффективной проводимости



### Численные эксперименты





Что такое вычислительная физика горных пород (digital rock physics)?

#### • Масштаб пор

- о Расчет упругих модулей
- о Расчет удельного сопротивления
- Расчет абсолютной проницаемости
- о Моделирование химического взаимодействия флюида с породой
- Масштаб керна
  - о Трещиновато-пористые среды wave-induced fluid flows
- Масштаб пласта
  - о Сейсмическое моделирование
  - о Геомеханическое моделирование

# Актуальность



 

 Para Consort
 Para Consort

 Organization
 Injection

 Organization
 Injection

Химическая обработка пласта Захоронение СО2 Закачка неконденсирующихся газов в геотермальные формации Захоронение отходов Тромбообразование в сосудах

# Модели на уровне резервуара



$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho) = \nabla \cdot (\rho \vec{q}), \qquad \vec{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla P,$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi C) + \nabla \cdot (\vec{q}C) - \nabla \cdot (\varphi D \nabla C) = f$$
$$\frac{\partial}{\partial t}\varphi = g(\varphi, C, ...)$$

Определены эмпирически ....

 $k(\varphi, \dots) = ?$  $D(\varphi, \dots) = ?$ 

. . . . . .

# Сейсмический мониторинг



$$\rho_f \frac{T}{\phi} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\eta}{k} q = -\nabla p - \rho_f \frac{\partial v}{\partial t}$$
$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma - \rho_f \frac{\partial q}{\partial t}$$
$$- \frac{\partial p}{\partial t} = M(\alpha \nabla \cdot v + \nabla \cdot q)$$
$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = (\lambda_u \nabla \cdot v + \alpha M \nabla \cdot q)I + \mu [\nabla v + (\nabla v)^T]$$

What we don't really know ....

 $k(\varphi, ....) = ?$   $D(\varphi, ....) = ?$   $T(\varphi, ....) = ?$   $\lambda(\varphi, ....) = ?$  $\mu(\varphi, ....) = ?$ 

# Масштаб пор



Поток

 $\nabla p - \mu \Delta \vec{u} = 0$ 

 $\nabla \cdot \vec{u} = 0$ 

Транспорт реагента  $\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}C) - \nabla \cdot (D\nabla C) = 0$  $D \frac{\partial C}{\partial \vec{n}} = k_r (C - C_s) \quad on \Gamma$ 

Движение границы

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = v_n \vec{n} = \frac{K_s k_r}{\rho} (C - C_s), \qquad \vec{x} \in \Gamma$$



# Level-set method

$$\Gamma(\vec{x}) = \left\{ \vec{x} \mid \varphi(\vec{x}, t) = 0 \right\},\$$
$$\left\| \nabla_x \varphi(\vec{x}, t) \right\| = 1$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{\partial\vec{x}}{\partial t}\nabla_x\varphi = 0$$











# Immersed boundary conditions

 $\nabla p - \mu \Delta u = 0,$  $\nabla \cdot u = 0$  $u(t, \Gamma) = u_B$ 



# Immersed boundary conditions

 $\nabla p - \mu \Delta u = 0,$  $\nabla \cdot u = 0$  $u(t, \Gamma) = u_B$ 

 $-h < \varphi(\vec{x}_I) < 0$ 



## Разные сценарии





(b)







### Изменение топологии порового пространства





(b)





Числа Бетти:

- В0 число односвязных областей
- В1 число циклов (число каналов в структуре)
- В2 число изолированных отверстий
- ВЗ Эйлерова характеристика





### Изменение топологии



### Изменение топологии





### Сравнение персистентных диаграмм







# Варьируемые параметры модели



Flow



Reactant transport  $\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}C) - \nabla \cdot (D\nabla C) = 0$ 

 $D \frac{\partial C}{\partial \vec{n}} = k_r (C - C_s) \quad on \ \Gamma$ 



Boundary movement

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = v_n \vec{n} = \frac{K(k_n)}{\rho} (C - C_s), \qquad \vec{x} \in \Gamma$$

# Численные эксперименты



# Численные эксперименты






# Эксперименты





# Эксперименты





- Что такое вычислительная физика горных пород (digital rock physics)?
- Масштаб пор
  - о Расчет упругих модулей
  - о Расчет удельного сопротивления
  - Расчет абсолютной проницаемости
  - Моделирование химического взаимодействия флюида с породой

#### • Масштаб керна

- о Трещиновато-пористые среды wave-induced fluid flows
- Масштаб пласта
  - о Сейсмическое моделирование
  - о Геомеханическое моделирование

# Физические эксперименты



Три типа физических экспериментов для разных диапазонов частот

# Физические эксперименты

источники



Ultrasonic – просвечивание на проходящих волнах



Пьезо-элементы приемники



# Численные эксперименты волновой режим







# Численные эксперименты, волновой режим





# Численные эксперименты, квази-статический режим

 $i\omega \frac{\eta}{k} \boldsymbol{w} = -\nabla p,$   $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0,$   $\boldsymbol{\sigma} = (\lambda_u \nabla \cdot \boldsymbol{u} + \alpha M \nabla \cdot \boldsymbol{w}) \boldsymbol{I} + \mu [\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T],$  $-p = \alpha M \nabla \cdot \boldsymbol{u} + M \nabla \cdot \boldsymbol{w}.$ 

#### **Oscillatory tests**



**Compression tests** 

Shear test

# Численные эксперименты, квази-статический режим



#### **Oscillatory tests**







**Compression tests** 

Shear test

#### Потоки флюидов, индуцированные сейсмическими волнами

#### Wave-induced fluid flow (WIFF):

- **Fracture-to-background** (background and fluid properties, fracture geometry);
- **Fracture-to-fracture** (fracture-filling material properties, fracture connectivity).

Correlation between fracture connectivity and seismic wave attenuation - ?



#### Background matrix



Fractures filled with highly porous material containing fluid

#### Моделирование волновых полей

#### **Numerical setup**



Initial signal – Ricker wavelet 
$$s(t) = \left(1 - 2\left[\pi\nu_0\left(t - \frac{3}{\nu_0}\right)\right]^2\right)e^{-\left[\pi\nu_0\left(t - \frac{3}{\nu_0}\right)\right]^2}$$

#### Моделирование волновых полей



2D discretization: staggered grid



#### Простые модели трещиноватости





• 52

#### Результаты - сейсмограммы

• Intersection of the fractures affects the wave amplitude and velocity



### Поглощение, обусловленное рассеянием



Rytov S.M., Kravtsov Yu.A., Tatarsky, V.I., 1978. Introduction to statistical radiophysics. Part II. Random fields, Moscow. Nauka, (in Russian)

## Сравнение результатов



## Сравнение результатов



## Дискретные системы трещин

- Fracture systems were generated with simulated annealing technique
- Objective function includes percolation probability
- 10 model sets (6 different percolation stages for each realisation) were generated



Fracture size – 0.004 m x 0.03 m Concentration – 15 %

Percolation increases

#### Анализ геометрии системы трещин



• 58

#### Поле давления



## Результаты моделирования





- Что такое вычислительная физика горных пород (digital rock physics)?
- Масштаб пор
  - о Расчет упругих модулей
  - о Расчет удельного сопротивления
  - Расчет абсолютной проницаемости
  - Моделирование химического взаимодействия флюида с породой
- Масштаб керна
  - о Трещиновато-пористые среды wave-induced fluid flows
- Масштаб пласта
  - о Геомеханическое моделирование
  - о Сейсмическое моделирование

#### Представление разломов при интерпретации





## Модели разломов и приразломных зон





## Необходимо реалистичное представление



## Численные методы моделирования разломов

#### Finite elements



#### Boundary elements





## Численные методы моделирования разломов



## Численные методы моделирования разломов

#### Finite elements



Boundary elements



+ Fault formation is defined by mechanics, not by user

- Computationally intense
- Calibration required



# Метод дискретных элементов





neighbouring particles

**Tangential** forces



Normal forces





# Граничные условия



Solid boundaries with given displacements

Elastic membrane with fixed pressure (normal stress)

# 2D эксперименты

-0.5

Statistical realizations









# 3D эксперименты







# Оценка эффективных параметров



Adam L., et al. Seismic wave attenuation in carbonates // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. - 2009. - V. 114. - N. B6. - pp. n/a-n/a.



Shapiro S., and Kaselow A. Porosity and elastic anisotropy of rocks under tectonic stress and pore-pressure changes // Geophysics. - 2005. - V. 70. - N. 5. - pp. N27-N38.
# Оцека скорости продольных волн

#### Statistical realizations











Mean

#### Финальная модель с приразломными зонами

Shale

Sand





#### Финальная модель с приразломными зонами





- Что такое вычислительная физика горных пород (digital rock physics)?
- Масштаб пор
  - о Расчет упругих модулей
  - о Расчет удельного сопротивления
  - Расчет абсолютной проницаемости
  - Моделирование химического взаимодействия флюида с породой
- Масштаб керна
  - о Трещиновато-пористые среды wave-induced fluid flows

#### • Масштаб пласта

- о Геомеханическое моделирование
- о Сейсмическое моделирование

## Сейсмическое моделирование





### Постановка задачи

В полупространстве z>0, определена система уравнений динамической теории упругости

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma,$$
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{2} \left( \nabla u + \nabla u^T \right)$$
$$\sigma = C\varepsilon$$



Начальные условия – нулевые.

Граничные условия – свободной поверхности при z=0 и условия предельного поглощения на бесконечности (аппроксимируется введением идеально согласованных слоев или PML).

Конечно-разностная аппроксимация

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{2} \left( \nabla u + \nabla u^T \right), \quad \sigma = C\varepsilon$$



J. Virieux, Geophysics, 1986

## Реализация

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma,$$

$$\tau, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{2} \Big( \nabla u + \nabla u^T \Big), \quad \sigma = C * \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}.$$

- 3D domain decomposition;
- Use of Isend, Irecv;
  - Use of MPI I/O.



#### Мелкомасштабные неоднородности



#### Локальное измельчение сеток



Измельчение шага по пространству

#### Параллельная реализация



Fine-grid area can be placed at any part of the model **regardless** to the domain decomposition used in coarse-grid model.

## Сейсмическое моделирование





# Сейсмические изображения



Обработка данных и построение сейсмических изображений проводились д.ф.-м.н. Протасовым в лаборатории 575.

## Палеозой

а Распределение Vp по модели №1



**б** Распределение Vp по модели №2



B

#### Распределение Vp по модели №3



Г Распределение Vp по модели №4



## Организация вычислений



## Система наблюдений





201 receivers lines with 400 receivers per line

40100 receiver channels per shot

## Контроль качества

#### Scaled model at 2300 Ms



#### Stacked section at 2300 Ms



### Объект исследования -

цифровые модели горной породы на разных масштабах на предмет разработки численных методов и алгоритмов для моделирования геофизических полей и оценки эффективных (усредненных) физических параметров геологической среды.



# Список публикаций с 2016 года

#### 1. Lisitsa V., Bazaikin Y., Khachkova T. Computational topology-based characterization of pore space changes due to chemical dissolution of rocks // Applied Mathematical Modelling. – 2020. – T. 88. – C. 21-37

- 2. Хачкова Т.С., Базайкин Я.В., Лисица В.В. Применение методов вычислительной топологии для анализа изменения порового пространства породы в процессе химического растворения // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2020. Т. 1. № 21. С. 41-55
- 3. Хачкова Т. С., et al. Численная оценка влияния шероховатых границ на упругие параметры слоистой среды // Вычислительные методы и программирование. 2020. V. 21. pp. 225-240.
- 4. Хачкова Т. С., et al. Численная оценка удельного электрического сопротивления горных пород по их цифровым изображениям с использованием графических со-процессоров // Вычислительные методы и программирование. 2020. V. 21. N. 3. pp. 306-318.
- 5. Прохоров Д. И., Базайкин Я. В., and Лисица В. В. Редукция цифрового изображения для анализа топологических изменений порового пространства породы в процессе химического растворения // Вычислительные методы и программирование. 2020. V. 21. pp. 319-328.
- 6. Novikov M. A., Lisitsa V. V., and Bazaikin Y. V. Wave Propagation in Fractured-Porous Media with Different Percolation Length of Fracture Systems // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. V. 41. N. 8. pp. 1533–1544.
- 7. Vishnevsky D. M., Solovyev S. A., and Lisitsa V. V. Numerical Simulation of Wave Propagation in 3D Elastic Media with Viscoelastic Formations // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. V. 41. N. 8. pp. 1603–1614.
- 8. Lisitsa V., Kolyukhin D., Tcheverda V. Statistical analysis of free-surface variability's impact on seismic wavefield // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019. T. 116. C. 86-95
- 9. Pleshkevich A., Vishnevskiy D., Lisitsa V. Sixth-order accurate pseudo-spectral method for solving one-way wave equation // Applied Mathematics and Computation. 2019. T. 359. C. 34-51
- 10. Caspari E., Novikov M., Lisitsa V., Barbosa N.D., Quintal B., Rubino J.G., Holliger K. Attenuation mechanisms in fractured fluid-saturated porous rocks: a numerical modelling study // Geophysical Prospecting. 2019. T. 67. № 4. C. 935-955
- 11. Cheverda V., Lisitsa V., Protasov M., Reshetova G., Glinsky B., Chernykh I., Merzlikina A., Volyanskaya V., Petrov D., Melnik A., Shilikov V. Digital twins of multiscale 3D heterogeneous geological objects: 3D simulations and seismic imaging of faults, fractures and caves // Journal of Physics: Conference Series. 4th International Conference on Supercomputer Technologies of Mathematical Modelling, SCTeMM 2019 (Moscow, Russian Federation, 19-21 June 2019). 2019. T. 1392. № 1.
- 12. Lisitsa V., Tchebverda V., Volianskaia V. GPU-accelerated discrete element modeling of geological faults // Journal of Physics: Conference Series. 4th International Conference on Supercomputer Technologies of Mathematical Modelling, SCTeMM 2019 (Moscow, Russian Federation, 19-21 June 2019). 2019. T. 1392. № 1.
- 13. Гадыльшина К.А., Хачкова Т.С., Лисица В.В. Численное моделирование химического взаимодействия флюида с горной породой [Электронный ресурс] // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии: Электронный научный журнал. 2019. Т. 20. № 4. С. 457-470
- 14. Новиков М.А., Лисица В.В., Козяев А.А. Численное моделирование волновых процессов в трещиновато-пористых флюидозаполненных средах // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии: Электронный научный журнал. 2018. Т. 19. № 2. С. 130-149
- 15. Новиков М.А., Базайкин Я.В., Лисица В.В., Козяев А.А. Моделирование волновых процессов в трещиновато-пористых средах: влияние связности трещин на поглощение сейсмической энергии [Электронный ресурс] // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии: Электронный научный журнал. 2018. Т. 19. № 3. С. 235-252
- Lisitsa V.V., Tcheverda V.A., Volianskaia V.V. GPU-based implementation of discrete element method for simulation of the geological fault geometry and position // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2018. T. 5. Nº 3. C. 46-50
- 17. Pleshkevich A.L., Lisitsa V.V., Vishnevsky D.M., Levchenko V.D., Moroz B.M. Parallel GPU-based implementation of one-way wave equation migration // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2018. T. 5. Nº 3. C. 34-37
- 18. Vishnevsky D.M., Kolyukhin D.R., Lisitsa V.V., Protasov M.I., Reshetova G.V., Tcheverda V.A., Qu D., Tveranger J. Correlation analysis of statistical facies fault models // Doklady Earth Sciences. 2017. T. 473. Nº 2. C. 477-481
- Bazaikin Y., Gurevich B., Iglauer S., Khachkova T., Kolyukhin D., Lebedev M., Lisitsa V., Reshetova G. Effect of CT image size and resolution on the accuracy of rock property estimates // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. T. 122. Nº 5. C. 3635-3647
- 20. Вишневский Д.М., Колюхин Д.Р., Лисица В.В., Протасов М.И., Решетова Г.В., Чеверда В.А., Ку Д., Тверангер Я. Корреляционный анализ статистической фациальной модели разломной зоны // Доклады РАН. 2017. Т. 473. № 6. С. 719-723
- 21. Kolyukhin D.R., Lisitsa V.V., Protasov M.I., Qu D., Reshetova G.V., Tveranger J., Tcheverda V.A., Vishnevsky D.M. Seismic imaging and statistical analysis of fault facies models // Interpretation. 2017. T. 5. Nº 4. C. 1-47
- 22. Гадыльшин К.Г., Колюхин Д.Р., Лисица В.В., Протасов М.И., Решетова Г.В., Хачкова Т.С., Чеверда В.А., Козяев А.А., Колесов В.А., Мерзликина А.С., Шиликов В.В. Оценка возможности выделения тонких кавернозных прослоев по рассеянным волнам в трещиноватом разрезе Юрубчено-Тохомского месторождения // Технологии сейсморазведки. 2017. № 1. С. 56-62
- 23. Плешкевич А.Л., Вишневский Д.М., Лисица В.В. Разработка волновой псевдоспектральной 3D-глубинной сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд // Геофизика. 2017. № S. С. 94-101
- 24. Базайкин Я.В., Колюхин Д.Р., Лисица В.В., Новиков М.А., Решетова Г.В., Хачкова Т.С. Влияние масштаба микротомографических изображений на оценку макромасштабных свойств породы // Технологии сейсморазведки. 2016. № 2. С. 38-47
- 25. Колюхин Д.Р., Лисица В.В., Решетова Г.В. Влияние изменчивости свободной поверхности на повторяемость данных сейсмического мониторинга // Технологии сейсморазведки. 2016. № 1. С. 69-76
- 26. Lisitsa V. Dispersion analysis of discontinuous Galerkin method on triangular mesh for elastic wave equation // Applied Mathematical Modelling. 2016. T. 40. No 7-8. C. 5077-5095
- 27. Lisitsa V., Tcheverda V., Botter C. Combination of the discontinuous Galerkin method with finite differences for simulation of seismic wave propagation // Journal of Computational Physics. 2016. T. 311. C. 142-157