

А. В. Кирюхин

**ГЕОТЕРМОФЛЮИДОМЕХАНИКА  
гидротермальных, вулканических  
и углеводородных систем**





РФФИ

---

А. В. Кирюхин

ГЕОТЕРМОФЛЮИДОМЕХАНИКА  
гидротермальных,  
вулканических  
и углеводородных систем

---



ЭКО • ВЕКТОР  
Санкт-Петербург  
2020

УДК 556.3  
ББК 26.35  
К43

Автор:

*Алексей Владимирович Кирюхин* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН

Рецензенты:

*Василий Юрьевич Лаврушин* — доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора Геологического института РАН;

*Виктор Михайлович Сугробов* — кандидат геолого-минералогических наук, лауреат государственной премии РФ;

*Иван Федорович Делемень* — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН

Утверждено к изданию ученым советом Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (ИВиС ДВО РАН)

(выписка из протокола № 6 от 17.06.2020)

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 20-15-00019/20 от 02.03.2020, не подлежит продаже.



**Кирюхин, А.В.**

К43 Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / А.В. Кирюхин. — Санкт-Петербург : Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. — 431 с. : ил. ISBN 978-5-907219-02-1

Геотермофлюидомеханика рассматривается как объединение инструментов TOUGH2-моделирования (Pruess, 1991, 1998) и геомеханики резервуаров (Zoback, 2010). В теоретической части излагается теория (TOUGH2) неизотермической геофильтрации многофазных многокомпонентных флюидов в трещинно-пористой среде с учетом химического взаимодействия вода – порода (TOUGHREACT). Далее излагается теория тектонических напряжений и роли порового давления, фрикционного равновесия, условий гидроразрыва с активизацией сдвиговых трещин. Изложен метод использования сейсмических и гидрогеологических данных для выявления активных (продуктивных) разломов (Frac-Digger).

Рассматриваются приложения геотермофлюидомеханических моделей для анализа условий функционирования, формирования и прогноза эксплуатации гидротермальных, вулканических и углеводородных систем на примерах: Мутновско-Паратунского геотермального района, Авачинско-Корякского кластера вулканов, гейзеров Долины гейзеров и кальдеры Узон, Йеллоустонской магмо-гидротермальной системы, Паужетского геотермального месторождения, техногенных термоаномалий, Ключевской группы вулканов, вулканогенных нефтяных резервуаров (Рогожниковский (Западная Сибирь), Белый Тигр (Вьетнам)), водно-метановых залежей Западной Камчатки. Региональные активные разломы и сейсмичность Камчатки рассматриваются с геотермофлюидомеханических позиций.

Ключевые слова: геофлюиды, TOUGH2, CFRAC, Frac-Digger, моделирование, гидротермальный, вулкан, сейсмичность, магма, фразинг, CO<sub>2</sub>, магма, нефть, газ, гейзер, Камчатка.

УДК 556.3  
ББК 26.35

**Kiryukhin, A.V.**

К43 Geothermofluidmechanics Hydrothermal, Volcanic and Hydrocarbon Systems / A.V. Kiryukhin. — Saint Petersburg : Eco-Vector I P, 2020. — 431 p. ISBN 978-5-907219-02-1

Geothermofluidmechanics is considered as integration of tools of TOUGH2-modeling (Pruess, 1991, 1998) and reservoirs geomechanics (Zoback, 2010). In theoretical part a basics of TOUGH2-theory of multi-phase nonisothermal geofluids flows in fracture-matrix media with water-rock chemical interaction (TOUGHREACT) was explained. Then theory of tectonic stresses, role of pore pressure, frictional equilibrium and conditions of hydro-fracturing was presented. Method of using seismic and hydrogeological data to identify active (production) faults (Frac-Digger) was described.

Applications of thermal-hydrodynamic and geomechanical models to analysis of the conditions of formation, functionality and forecast of the exploitation are cover hydrothermal, volcanic and hydrocarbon systems: Mutnovsky-Paratunsky geothermal area, Avachinsko-Koryaksky volcanic basin, geysers of Valley and Uzon caldera, Yellowstone magma-hydrothermal system, Pauzhetsky production reservoir, technogenic thermal anomalies, Kluchevskoy group of volcanoes, volcanic oil reservoirs (Rogozhnikovsky (West Siberia), White Tiger (Vietnam)) and methane-water reservoirs in Kamchatka are used as examples. Regional active faults and seismicity in Kamchatka are considered from geofluidmechanics point of view.

Keywords: Geofluids, TOUGH2, CFRAC, Frac-Digger, modeling, hydrothermal, volcano, seismicity, magma, fracking, CO<sub>2</sub>, oil, gas, geyser, Kamchatka.

ISBN 978-5-907219-02-1

© Кирюхин А.В., 2020

© ООО «Эко-Вектор Ай-Пи», 2020

# Оглавление

Введение .....	7
<b>Часть 1. ОСНОВЫ ГЕОТЕРМОФЛЮИДОМЕХАНИКИ .....</b>	<b>15</b>
<i>Глава 1</i>	
<i>Введение в многофазную многокомпонентную неизотермическую фильтрацию в трещинно-пористой среде .....</i>	<i>16</i>
1.1. Краткие сведения из теории однофазной изотермической геофильтрации	16
1.2. Управляющие уравнения неизотермической многофазной геофильтрации	19
1.3. Управляющие уравнения химического взаимодействия вода – порода (TOUGHREACT) .....	21
<i>Глава 2</i>	
<i>Принципы и технологии численного TOUGH2-моделирования .....</i>	<i>22</i>
2.1. Интегро-конечно-разностная аппроксимация управляющих уравнений ...	22
2.2. Модули состояния флюидов EOS .....	24
2.3. Определение граничных условий, источников и стоков .....	32
2.4. Начальные условия .....	35
2.5. Определение на модели фильтрационно-емкостных свойств .....	36
2.6. Инверсионное iTOUGH2-моделирование .....	38
<i>Глава 3</i>	
<i>Моделирование многофазной неизотермической геофильтрации с использованием программы PetraSim .....</i>	<i>43</i>
3.1. Алгоритм сборки численной модели, тестовые задачи .....	43
3.2. Определение геометрии модели и генерация вычислительных сеток .....	45
3.3. Краткий обзор тестовых задач для программы TOUGH2 .....	46
<i>Глава 4</i>	
<i>Основы гидрогеомеханики .....</i>	<i>54</i>
4.1. Поле тектонических напряжений (стрессов), поровое давление и эффективное напряжение (стресс) .....	54
4.2. Тензор напряжений (стрессов) и его преобразование при вращении координат .....	61
4.3. Теория фрикционного равновесия и оценка геомеханического состояния	64
4.4. Активные (продуктивные) разломы, Frac-Digger. Гидромеханическое моделирование, CFRAC .....	66

## Часть 2 ПРИЛОЖЕНИЯ ГЕОТЕРМОФЛЮИДОМЕХАНИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ, ВУЛКАНИЧЕСКИХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ ... 79

### Глава 5

<i>Условия формирования и эксплуатации Мутновского геотермального месторождения</i> .....	80
5.1. Мутновский геотермальный район как полигон для решения фундаментальной задачи геотермальной вулканологии и развития геотермальной энергетики .....	80
5.2. Геологическая стратификация и продуктивные зоны, магматическая активность и распределение температуры .....	83
5.3. Условия водного питания/разгрузки продуктивного резервуара по газогидрохимическим и изотопным данным .....	89
5.4. Характеристики Мутновского продуктивного резервуара, полученные с использованием TOUGH2-моделирования .....	94
5.5. Концептуальное 2D-термогидродинамическое моделирование Мутновского вулкана и прилегающей гидротермальной системы .....	100
5.6. Мутновский вулкан — инжектор воды и магмы, возможности расширения ГеоЭС .....	108
Приложение 5-А. Таблицы химического и изотопного состава флюидов .....	109
Приложение 5-Б. Фотографии .....	118

### Глава 6

<i>Механизм функционирования гейзеров</i> .....	121
6.1. Где находятся гейзеры и почему они работают .....	121
6.2. Гидрогеологические условия и обвально-оползневые явления в Узон-Гейзерной кальдере .....	126
6.3. Цикличность гейзеров и гидрогеологические наблюдения в 2007–2019 гг. ....	133
6.4. TOUGH2-моделирование функционирования гейзера Великан .....	145
6.5. Обсуждение роли CO <sub>2</sub> в истории гейзера Великан .....	155
6.6. Гейзеры в окружении Подпрудных озер и в ожидании притока магматического CO <sub>2</sub> .....	157
Приложение 6-А. Локальные координаты гейзеров, таблицы химического и изотопного состава флюидов .....	158
Приложение 6-Б. Фотографии .....	164

### Глава 7

<i>Условия формирования нефтяных и водно-метановых залежей в вулканогенных и магматогенных резервуарах</i> .....	169
7.1. Моделирование условий формирования Рогожниковского нефтяного вулканогенного резервуара (Западная Сибирь) .....	169
7.2. Моделирование условий формирования нефтяной залежи в гранитном массиве (Белый Тигр, Вьетнам) .....	187
7.3. Водно-метановые резервуары вулканогенных бассейнов .....	201

**Глава 8**

<i>Условия формирования углекислых CO<sub>2</sub>-резервуаров в Корякско-Авачинском вулканогенном бассейне</i> .....	211
8.1. Может ли Авачинский вулкан помочь геотермальной энергетике? .....	211
8.2. Крайний обзор изученности питающих магматических систем вулканов. . .	214
8.3. Структурно-гидрогеологические условия и магматическая активность . . .	217
8.4. Условия водного питания и разгрузки Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна по газогидрохимическим и изотопным данным . . .	230
8.5. Концептуальное термогидродинамическое моделирование формирования гидротермальной системы под Корякским вулканом .....	238
8.6. Термо-газо-гидрохимическая чувствительность термоминеральных источников на вулканическую активность и землетрясения .....	246
8.7. Гидродинамическое 3D-моделирование Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна в целом .....	250
8.8. Тепловой и массовый баланс Корякского вулкана .....	253
8.9. Высокотемпературная гидротермальная система в северном секторе Корякского вулкана .....	254
Приложение 8-А. <b>Фотографии</b> .....	257

**Глава 9**

<i>Условия формирования и эксплуатации Паратунского геотермального месторождения</i> .....	261
9.1. Низкотемпературные геотермальные месторождения и прямое использование геотермальной энергии .....	261
9.2. Гидрогеологическая стратификация .....	264
9.3. 3D-Анализ распределения продуктивности в геотермальном резервуаре	265
9.4. 3D-Анализ распределения температуры и давления в геотермальном резервуаре .....	269
9.5. Условия водного питания продуктивного резервуара по газогидрохимическим и изотопным данным ( $\delta D$ , $\delta^{18}O$ ) .....	272
9.6. Термогидродинамическое химическое моделирование (TOUGH2-EOS1+tracer) .....	279
9.7. Структура термopроницаемости и условия водного питания/разгрузки, возможности использования Паратунского геотермального месторождения в режиме насосной эксплуатации .....	292
Приложение 9-А. <b>Таблицы химического и изотопного состава флюидов</b> .....	295

**Глава 10**

<i>Магматический фракинг в Йеллоустонской магмо-гидротермальной системе (США)</i> .....	298
10.1. Йеллоустонская магмо-гидротермальная система (Fournier, Pitt, 1985). . .	298
10.2. Основные результаты изучения Йеллоустонской магмо-гидротермальной системы по состоянию на 2018 г. <a href="https://volcanoes.usgs.gov/volcanoes/yellowstone/monitoring_map.html">https://volcanoes.usgs.gov/volcanoes/yellowstone/monitoring_map.html</a> .....	300
10.3. Йеллоустонская магмо-гидротермальная система как аналог разработки сланцевой нефти и газа .....	305

**Глава 11**

<i>Магматический фракинг в Северной группе вулканов и моделирование глубинной гидротермальной циркуляции</i> .....	309
11.1. Вулканы без гидротермальных разгрузок .....	309
11.2. Анализ магматической деятельности перед извержением вулкана Плоский Толбачик в 2012 г. ....	310
11.3. Магматическая деятельность в районе Северной группы вулканов в 2000–2017 гг., по данным локальной сейсмичности .....	318
11.4. Геомеханические условия под вулканами Ключевской, Безымянный, Толбачик и Шивелуч .....	325
11.5. TOUGH2-моделирование глубинной гидротермальной циркуляции ...	326
11.6. Являются ли магматические очаги стационарными? .....	332
11.7. Подготовка резервуаров для заполнения геотермальными флюидами ...	333
Приложение 11-А. <b>Фотографии</b> .....	335

**Глава 12**

<i>Условия формирования и эксплуатации среднетемпературных геотермальных резервуаров</i> .....	337
12.1. Условия формирования и эксплуатации Паужетского геотермального месторождения .....	337
12.2. Моделирование условий формирования техногенных термоаномалий	370
12.3. Термогидродинамическое химическое моделирование условий формирования гейзеров в риолитовых туфах .....	380

**Глава 13**

<i>Геомеханическая интерпретация региональной сейсмичности на Камчатке и прилегающем Восточном шельфе</i> .....	387
---	-----

**Глава 14**

<i>Гидромеханическое моделирование магматического фракинга</i> .....	394
14.1. Анализ магматической активности под Мутновским вулканом с использованием гидромеханического CFRAC-моделирования .....	394
14.2. Анализ магматической активности под Корякским вулканом с использованием гидромеханического CFRAC-моделирования .....	402
14.3. Сопоставление ориентации плоско-ориентированных кластеров и механизмов землетрясений .....	405
Заключение .....	408
Библиографический список .....	416