



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

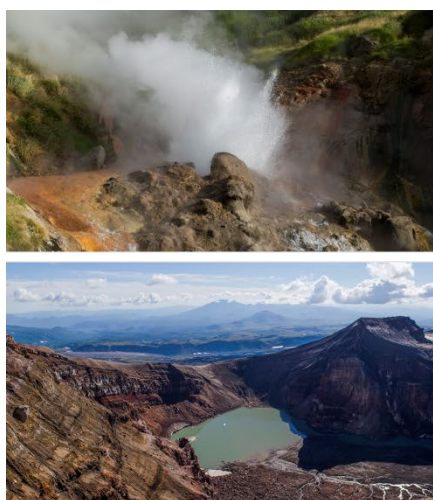
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**Всероссийская научная конференция  
с международным участием  
«Геотермальная вулканология,  
гидрогеология, геология нефти и газа»  
(Geothermal Volcanology Workshop 2022)**

29 августа – 3 сентября 2022 г.

*Конференция проведена при поддержке  
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

**Материалы конференции**



ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ

2022



**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE  
RUSSIAN FEDERATION**

**INSTITUTE OF VOLCANOLOGY AND SEISMOLOGY**

**FAR EASTERN BRANCH  
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

# **PROCEEDINGS**

**of All-Russian Scientific Conference  
with International Participation**

**«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology»  
(Geothermal Volcanology Workshop 2022)**

*Conference was supported by Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*

**Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,  
Petropavlovsk-Kamchatsky  
August 29 – September 3, 2022**



**PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY  
2022**

УДК 550.36+551.21+553.6+556.3

Научное издание

**Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2022), 29 августа – 3 сентября 2022 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. – 118 с.**

**Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2022), August 29 – September 3, 2022 – Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2022. – 118 p.**

ISBN 978-5-902424-38-3

This Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil & Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2022) was held in Petropavlovsk-Kamchatsky in 2022 by Institute of Volcanology & Seismology FEB RAS. The results of geothermofluidmechanics studies of the volcanic, hydrothermal & hydrocarbon systems are presented.

В сборнике представлены материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2022), проведенной Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в 2022 г. Освещаются результаты исследований геотермофлюидомеханики вулканических, гидротермальных и углеводородных систем.

*Редакционная коллегия:*

**д.г.-м.н., проф. А.В. Кирюхин, д.г.-м.н. Г.Н. Копылова, д.г.-м.н. В.Ю. Лаврушин,  
доктор, проф. Бо Фэн**

**Dr., Prof. A.V. Kiryukhin, Dr. G.N. Kopylova, Dr. V.Y. Lavrushin, Dr., Prof. Bo Feng**

*Отв. редактор:*

**д.г.-м.н. А.В. Кирюхин**

*Ответственные секретари:*

**О.А. Гололобова, Е.В. Черных, М.В. Кузнецова**

ISBN 978-5-902424-38-3

© ИВиС ДВО РАН, 2022

## Содержание

### РАЗДЕЛ I. МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ И СУПЕРКРИТИЧЕСКИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

*Кирюхин А.В.*

Геомеханические условия формирования вулканических и гидротермальных систем ..... 9

*Алексеенко С.В.*

Геотермальная энергетика: технологии и перспективы развития ..... 14

*Ефимов Н.Н., Париуков В.И., Ощепков А.С., Рыжков А.В., Блохин Э.Е., Фисенко Л.Н., Черкесов А.Ю., Русакевич И.В.*

Энергетические установки на базе использования геотермальных источников энергии .... 18

### РАЗДЕЛ II. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

*Кузнецова М.В., Кирюхин А.В.*

Виктор Михайлович Сугробов. К 90-летию со дня рождения ..... 24

*Калачева Е.Г.*

Геохимия ультракислых термальных вод вулкана Баранского  
(о. Итуруп, Курильские острова) ..... 28

*Кириллов В.Е., Лапенко А.С.*

Рудоносный метасоматоз в вулканогенных формациях  
Дальнего Востока России – от докембрия до наших дней ..... 32

*Журавлев Н.Б.*

Моделирование условий термогидродинамического взаимодействия  
между Паратунским и Верхне-Паратунским месторождениями ..... 36

### РАЗДЕЛ III. СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ, ВУЛКАНИЧЕСКИХ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ, АКТИВНЫЕ И ПРОДУКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ

*Поляков А.Ю.*

Магматическая активность Мутновского вулкана и перспективы расширения Мутновского  
геотермального месторождения ..... 41

*Добрынина А.А., Саньков В.А., Борняков С.А., Король С.А., Саньков А.В.*

Вариации микросейсмических шумов  
перед Кударинским землетрясением 09 декабря 2020 г. с  $M_w=5,6$  ..... 45

*Кузьмин Ю.Д., Сергеев В.А., Остроухов С.А.*

Флуктуации термодинамических параметров гидротермальной системы как отклик  
системы на внешние воздействия ..... 49

*Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Добрынина А.А., Саньков А.В., Парфеевец А.В., Лебедева  
М.А., Ефимов Е.Ю.*

Напряженно-деформированное состояние земной коры  
Северомуйского геотермального района (Байкальская рифтовая система) ..... 53

*Соломатин А.В.*

Энергетический спектр сейсмического процесса как отражение геодинамических  
процессов ..... 56

## РАЗДЕЛ IV. МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

*Кулаков И.Ю.*

Сейсмотомографические изображения магматических  
и геотермальных источников под активными вулканами ..... 61

*Логинов В.А., Гонтовая Л.И., Сеньюков С.Л., Улыбышев И.С.*

Геофизические неоднородности и предполагаемая флюидная модель земной коры  
(район Авачинского вулкана) ..... 63

*Лемзиков М.В.*

Анализ магматической активности Северной группы вулканов в 2022 году с  
использованием программы Frac-Digger ..... 67

*Черных Е.В., Пузанков М.Ю., Кирюхин А.В.*

Дайковое поле на южном склоне Корякского вулкана,  
как аналог активной магматической деятельности ..... 71

## РАЗДЕЛ V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ

*Фэн Бо, Цуй Чжэнпэн*

Экспериментальное исследование эффекта и механизма химической стимуляции  
на глубоком высокотемпературном граните ..... 75

*Бубнова Н.Я., Лементуева Р.А., Хромов А.А.*

Геомеханический анализ образования трещины на образцах горных пород  
по коэффициенту Лоде-Надаи ..... 78

*Лунина О.В., Гладков А.А.*

Разрывные деформации конусов выноса и перспективы поиска эндогенного тепла  
в зонах разломов на основе оптической и тепловизионной съемки с помощью БПЛА ..... 81

*Борняков С.А., Добрынина А.А., Шагун А.Н., Саньков В.А., Салко Д.В., Мирошниченко А.И.,  
Встовский Г.В., Синцов А.Е.*

От закономерностей реализации деформаций льда  
перед ледовыми ударами к поискам предвестников тектонических землетрясений ..... 84

## РАЗДЕЛ VI. МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ И КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Усачева О.О., Карташева Е.В., Назарова М.А., Кузьмина А.А.*

Влияние вторичных минералов на показания Na-K геотермометра  
на примере гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) ..... 90

*Усачева О.О., Кирюхин А.В.*

Анализ данных за 2021 г. по режиму гейзеров Большой и Великан  
(Долина Гейзеров, Камчатка) ..... 95

*Кирюхин А.В.*

Применение хлоридного трассерного метода  
для оценки объемов извержений гейзеров и динамики разгрузки гидротермальных систем ..... 99

**РАЗДЕЛ VII. ДОКЛАДЫ,  
ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ ТОЛЬКО ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ**

<i>Кендирбаева Дж.Ж.</i>	
Условия формирования геотермальных вод Кыргызского Тянь-Шаня .....	104
<i>Делемень И.Ф., Карпов Г.А.</i>	
Флюидные системы Камчатки - перспективная ресурсная база развития геотермальной энергетики с позиций концепции онтогении гидротермального процесса .....	109
<i>Байрамова А.С.</i>	
TOUGH2 и iTOUGH2 моделирование водно-метанового месторождения.....	113

## TABLE OF CONTENTS

### CHAPTER I. MAGMA-HYDROTHERMAL AND SUPERCRITICAL GEOTHERMAL SYSTEMS

<i>Kiryukhin Alexey</i> Geothermofluidmechanics of volcanic and hydrothermal systems .....	9
<i>Alekseenko Sergey</i> Geothermal Energy: Technologies and Development Prospects .....	14
<i>Efimov Nikolai, Parshukov Vladimir, Oshchepkov Andrei, Ryzhkov Anton, Blokhin Eduard , Fisenko Lev, Cherkesov Arkadii, Rusakevich Irina</i> Power plants based on the use of geothermal energy sources .....	18

### CHAPTER II. HYDROTHERMAL SYSTEMS OF VOLCANIC REGIONS

<i>Kuznetsova Marina, Kiryukhin Alexey</i> Dedicated to the 90th anniversary of Viktor Mikhailovich Sugrobov .....	24
<i>Kalacheva Elena</i> Geochemistry of Ultra-acid Thermal Water of the Baransky Volcano (Iturup Island, Kuril Islands) ..	28
<i>Kirillov Vadim, Lapenko Alexander</i> Ore-bearing Metasomatism in Volcanogenic Formations of the Russian Far East – from the Precambrian to the Present Day .....	32
<i>Zhuravlev Nikita</i> TOUGH2- modeling of thermal-hydrodynamic interaction conditions between the Paratunsky and Upper-Paratunsky fields .....	36

### CHAPTER III. SEISMICITY IN GEOFLUID, VOLCANIC AND HYDROTHERMAL SYSTEMS, ACTIVE AND PRODUCTIVE FAULTS

<i>Polyakov Andrey</i> Magmatic activity of the Mutnovsky volcano and prospects for the expansion of the Mutnovsky geothermal field.....	41
<i>Dobrynina Anna, Sankov Vladimir, Bornyakov Sergey, Korol Svetlana, Sankov Alexey</i> Ambient Noise Variations before the Kudara Earthquake, 09 December 2020, Mw=5,6 .....	45
<i>Kuzmin Yury, Sergeev Vasily, Ostroukhov Sergey</i> Fluctuations of thermodynamic parameters of a hydrothermal system as a response of the system to external influences .....	49
<i>Sankov Vladimir, Miroshnitchenko Andrey, Dobrynina Anna, Sankov Alexey, Parfeevets Anna, Lebedeva Marina, Efimov Evgeny</i> Crustal stress-strain state in the North Muya geothermal region (Baikal rift system) .....	53
<i>Solomatin Aleksey</i> Energy spectrum of the seismic process as a reflection of geodynamic processes .....	56

## CHAPTER IV. IGNEOUS SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

*Koulakov Ivan*

Seismic Tomography Images of Magmatic and Geothermal Sources beneath Active Volcanoes..... 61

*Loginov Vladislav, Gontovaya Larisa, Senyukov Sergey, Ulybyshev Ilya*

Geophysical Heterogeneity and a Supposed Fluid Model of the Earth's Crust  
(Avachinsky Volcano Area)..... 63

*Lemzikov Michail*

Analysis of the magmatic activity of the Northern group volcanoes in 2022  
using the program Frac-Digger ..... 67

*Chernykh Evgenia, Puzankov Mikhail, Kiryukhin Alexey*

The Dyke Field on the Southern Slope of the Koryaksky volcano,  
as an Analogue of Active Magmatic activity ..... 71

## CHAPTER V. MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER, GEOMECHANICAL PROCESSES AND CHEMICAL INTERACTIONS IN GEOFLUID SYSTEMS

*Feng Bo, Cui Zhenpeng*

Experimental Study on Effect and Mechanism of Chemical Stimulation  
on Deep High-Temperature Granite ..... 75

*Bubnova Natalia, Lementueva Rita, Khromov Anton v*

Geomechanical analysis of fracture formation on rock samples by Lode-Nadai coefficient ..... 78

*Lunina Oksana, Gladkov Anton*

Brittle deformations of fans and Earth's internal heat search prospects  
in fault zones based on optical and thermal imaging using UAVs ..... 81

*Bornyakov Sergey, Dobrynina Anna, Shagun Artem, Sankov Vladimir, Salko Denis,  
Miroshnichenko Andrey, Vstovsky Grigory, Sintsov A.E.*

From the regularities of the realization of ice deformations  
before ice strikes to the search for precursors of tectonic earthquakes..... 85

## CHAPTER VI. MECHANISM OF FUNCTIONING OF GEYSERS AND CATASTROPHIC PROCESSES IN HYDROTHERMAL SYSTEMS

*Sergeeva Anastasia, Kiryukhin Alexey, Usacheva Olga, Kartasheva Elena, Nazarova Maria,  
Kuzmina Anna*

Influence of secondary minerals on Na-K geothermometer readings in the  
Valley of Geysers hydrothermal system (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka)..... 90

*Usacheva Olga, Kiryukhin Alexey*

Analysis of data obtained in 2021 of the Bolshoy and Velikan geysers regime  
(Valley of Geysers, Kamchatka)..... 95

*Kiryukhin Alexey*

Application of the chloride tracer method to estimate the volume of geyser eruptions and the  
dynamics of mass discharge of hydrothermal systems..... 99



## CHAPTER VII. PAPERS SUBMITTED FOR PUBLICATION ONLY

*Kendirbaeva Dzumagul*

Conditions for the Formation of Geothermal Waters if the Kyrgyz Tien Shan ..... 104

*Delemen Ivan, Karpov Gennady*

Fluid Systems of Kamchatka Promising Resource Base for the Development  
of Geothermal Energy from the notion of the Concept of Ontogeny of the Hydrothermal Process ..... 109

*Bayramova Aynur*

TOUGH2 and iTOUGH2 modeling of a water-methane field..... 113

## РАЗДЕЛ I. МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ И СУПЕРКРИТИЧЕСКИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

### CHAPTER I. MAGMA-HYDROTHERMAL AND SUPERCRITICAL GEOTHERMAL SYSTEMS

УДК 556.3

#### Геомеханические условия формирования вулканических и гидротермальных систем

А.В. Кирюхин

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
AVKiryukhin2@mail.ru*

Показано, что активность вулканов может быть эруптивной и магматической, режим их деятельности определяется геомеханическими условиями. В условиях горизонтального растяжения земной коры эруптивная продуктивность активных вулканов максимальна (Ключевской вулкан). В условиях горизонтального сжатия коры активные вулканы являются инжекторами воды и магмы в прилегающие геофлюидные резервуары, формируют высокотемпературные гидротермальные системы (Мутновский вулкан). Региональные сейсмогенные разломы Камчатки являются индикаторами генерации водных флюидов в слэбе в режиме гидроразрыва до глубин 250 км, обеспечивающими водой плавление мантийного клина и последующую вулканическую деятельность.

**Ключевые слова:** вулкан, гидротермальная система, магма, вода, слэб, сейсмичность, гидроразрыв

#### Geothermofluidmechanics of volcanic and hydrothermal systems

Alexey Kiryukhin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

It is shown that the activity of volcanoes can be eruptive and magmatic, the mode of their activity being determined by geomechanical conditions. Under Earth crust horizontal extension conditions, the eruptive productivity of active volcanoes is maximal (Kliuchevskoy volcano). Under horizontal crust compression, active volcanoes are injectors of water and magma into the adjacent geofluidic reservoirs and form high-temperature hydrothermal systems (Mutnovsky volcano). Regional seismogenic faults of Kamchatka are indicators of generation of aqueous fluids in the slab in the hydrofracture mode to depths of 250 km, providing water for melting of the mantle wedge and subsequent volcanic activity.

**Keywords:** volcano, hydrothermal system, magma, water, slab, seismicity, hydrofracturing

#### Введение

Развитие теоретических основ и использование эффективных вычислительных инструментов геотермофлюидомеханики для описания природных и геотехнологических процессов необходимы в связи с решением фундаментальных проблем наук о Земле. Среди этих проблем выделяются следующие: 1) описание и прогноз функционирования вулканов и прилегающих к ним гидротермальных систем; 2) формирование естественных и искусственных циркуляционных систем в виде продуктивных гидротермальных, нефтяных и газовых резервуаров с использованием термолифта, гидроразрыва и химического преобразования вмещающих горных пород; 3) выяснение условий генерации сильнейших землетрясений и их прогноз.

### **Геомеханические условия извержений вулканов (Северная группа вулканов)**

Северная группа вулканов включает вулканы Ключевской, Крестовский, Ушковский, Безымянный, Плоский Толбачик, в 80 км к северо-востоку от Ключевского вулкана находится действующий влк. Шивелуч. Гигантский стратовулкан Ключевской (возраст менее 7 тыс. лет) является наиболее продуктивным, он обеспечивает в среднем 60 млн. т базальтов в год или 1/4 часть общего годового количества пород, продуцируемых всеми 70 вулканами Курило-Камчатского вулканического пояса. Ключевской вулкан является с 1935 г. предметом детальных сейсмологических и вулканологических наблюдений, результаты которых изложены в многочисленных работах и их обобщениях (Федотов, 2006; Федотов и др. 2007; Федотов и др. 2010, Федотов и др. 2014, Озеров, 2019). В последние годы с использованием методов сейсмической томографии получены данные о динамике заполнения/дренирования магматических питающих систем Ключевского вулкана (Koulakov et al, 2013, 2021).

Магматическая активность Ключевской группы вулканов и влк. Шивелуч оценивается (Frac-Digger метод, Кирюхин и др., 2016) по сейсмологическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН следующим образом: 1) первичный магматический очаг, питающий группу вулканов, находится, вероятно, на глубине от –165 до –205 км под Ключевским вулканом, выше находятся зоны инъекции магмы в виде даек и силлов, интерпретируемые как коровый К2 (от –31 до –28 км) и периферический К1 (от –1 до +2 км абс.) магматические очаги; 2) влк. Толбачик характеризуется инъекциями даек в интервале глубин от –8 до –1 км; 3) под влк. Безымянный инъекции магмы происходят в виде силлов в диапазоне глубин от –2 до +2 км, где можно предполагать периферический магматический очаг. Его питание осуществляется по дайкам из корового магматического очага влк. Ключевской К2; 4) инъекции магмы в виде силлов в диапазоне глубин от –4 до –2 км абс. и от 0 до +2 км преобладают под влк. Шивелуч, где можно предполагать наличие двух периферических магматических очагов; 5) Доля магмы, аккумулирующейся под вулканами в процессе их функционирования, оценивается от 0,8% (Ключевской) до 72,9% (Шивелуч) от объема эруптивной деятельности этих вулканов.

Вулканы Северной группы являются индикаторами геомеханического состояния под ними: 1) под Ключевским вулканом преобладают в целом условия горизонтального радиального растяжения (NF), в зонах корового К2 и периферического очага К1 спорадически фиксируются локальные геомеханические условия радиального сжатия (RF); 2) под влк. Толбачик преобладают условия горизонтального растяжения с ориентацией максимального горизонтального напряжения в ЗСЗ-направлении; 3) под влк. Шивелуч и Безымянный фиксируются условия горизонтального сжатия. Зоны магматического фразинга (гидроразрыв при инъекции магмы в виде силлов и даек) в пределах активных вулканических аппаратов приводят к формированию проницаемых резервуаров с вертикальной протяженностью до 35 км (Ключевской) и поперечником до 15 км (Шивелуч) в зависимости от геомеханического состояния вмещающих массивов горных пород.

Вулканы Шивелуч и Безымянный находятся в условиях потенциально возможных катастрофических кальдерообразующих извержений с объемами 30, 900 и 50 км<sup>3</sup>, если рассматривать в качестве возможного объема извержения пространство от кровли указанных выше резервуаров, в которые происходит инъекция силлов (средние глубины 1,5 и 4 км (Шивелуч) и 1 км (Безымянный)) до топографической поверхности. По объему это сопоставимо с 3-м извержением магмо-гидротермальной системы Йеллоустоун (США).

### **Геомеханические условия формирования гидротермальных систем (Мутновский геотермальный район)**

Вулкан Мутновский представляет собой комплекс из четырех вулканических конусов (М1, М2, М3 и М4), которые последовательно проявляли активность начиная с позднего плейстоцена. Геология района детально изучена и обобщена в работах (Селянгин, 1993, 2009). Активность влк. Мутновский-1 (самым древним из четырех) осуществлялась 60–80 тыс. лет назад. Мутновский-1 сформировал базальтовые, андезибазальтовые, андезитовые и дацитовые лавы и пирокластические породы общим объемом около 58 км<sup>3</sup>. Влк.

Мутновский-2 функционировал 30–40 тыс. лет назад, центр его располагался в 3 км к юго-востоку от центра Мутновского-1, Мутновский-2 сформировал около 24 км<sup>3</sup> лавы и пирокластики. Состав вулканических пород Мутновского-2 варьирует от базальтовых до дацитовых и в целом аналогичен составу Мутновского-1. Влк. Мутновский-3 расположен между Мутновским-1 и Мутновским-2, имеет относительно небольшой объем вулканических пород (~5 км<sup>3</sup>). Мутновский-3 пронизан базальтовыми дайками, его центральная часть сложена гидротермально измененными породами. Состав вулканических пород. влк. Мутновский-3 варьирует от базальтовых до риодацитовых. Вершинная кальдера Мутновского-3 имеет размеры 1,5 × 2,0 км, она сформировалась в результате извержения 2,0–2,5 км<sup>3</sup> пемзы и в настоящее время частично заполнена ледником (2,5 км<sup>2</sup>) и потоками лавы из Мутновского-4. Окончание активности Мутновского-3 фиксируется выдавливанием дацитового купола, возраст которого оценивается по локальной тефростратиграфии около 4000 лет (Селянгин, 1993). Вулкан Мутновский-4 является самым молодым в комплексе Мутновских вулканов, его возраст оценивается около 11 тыс. лет (Селянгин, 1993). Мутновский-4 расположен в 1 км к ЮЮВ от Мутновского-3, его суммарный объем оценивается 3,8 км<sup>3</sup>. Мутновский-4 сложен лавами и пирокластическими потоками андезибазальтового состава.

Актуальная магматическая активность влк. Мутновский (2009–2021 гг) оценивается по сейсмологическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН (Frac-Digger метод) следующим образом:

1. Большая часть даек внедряется в северо-восточном секторе Мутновского вулкана на площади 2 × 10 км;
2. Большинство даек имеют угол падения от 20° до 40°, простирание СВ-ССВ;
3. Дайки внедряются на глубине от –4 до –2 км абс. Инъекции пологих даек в окрестностях влк. Мутновский соответствуют геомеханическим условиям горизонтального сжатия (RF), поэтому в настоящее время можно предполагать гидроразрыв в горизонтальной плоскости и формирование магистральных силлов. Преобразование геомеханических условий от горизонтального растяжения (вертикальные дайки с истечением магмы на поверхность Земли) к горизонтальному сжатию (горизонтальные силлы с аккумуляцией магмы в диапазоне глубин от –4 до –2 км абс), привели к тому, что режим активности Мутновского вулкана за последние 30 тыс. лет существенно изменился от эруптивной до магматической. Результатом магматической деятельности явилось формирование геотермальных месторождений в Северо-Мутновской зоне, на одном из них осуществляется эксплуатация Мутновских ГеоЭС с установленной электрической мощностью 62 МВт (Kiryukhin, 1996, Kiryukhin et al, 2018, Kiryukhin et al, 2022).

### **Региональные сейсмогенные разломы Камчатского слэба**

Для выявления дискретной сети региональных сейсмогенных разломов на Камчатке и прилегающем шельфе по данным каталогов сейсмических событий КФ ФИЦ ЕГС РАН используется методика выделения плоско-ориентированных кластеров землетрясений. Анализ ориентации выявленных плоско-ориентированных кластеров землетрясений применяется для выяснения геомеханического режима рассматриваемых участков земной коры, роли флюидов в их активизации. В качестве исходных данных для анализа использован региональный каталог землетрясений Камчатки КФ ФИЦ ЕГС РАН, включающий 5972 события с классом  $K_s$  выше 10 ( $M$  выше 4,25) за период 01.1980 – 02.2016 гг. Выявление сейсмогенных разломов осуществлялось с использованием программы Frac-Digger с параметрами:  $N \geq 6$ ,  $\delta t \leq \infty$ ,  $\delta Z \leq 10$  km,  $\delta R \leq 100$  km. Критерии выбора соответствуют опции выявления постоянно-действующих сейсмогенных региональных разломов.

В результате выявлено, что 98% от общего числа землетрясений формируют 156 плоско-ориентированных кластеров, интерпретируемых в качестве сейсмогенных разломов. Большая часть указанных разломов (до глубины 40 км) находится на восточном шельфе Камчатки между береговой линией и глубоководным желобом. Среди указанных выше разломов выделяется 17, характеризующихся наиболее высокой сейсмической активностью (более 100 событий). В целом преобладают разломы с углами падения 50–70° на

СЗЗ (300–310°), параллельные линии глубоководного желоба, при этом выделяются также разломы иного простирания и падения. Это указывает на региональные геомеханические условия растяжения в направлении СЗЗ (305°), осложненные локальными неоднородностями геологического строения слэба (пододвигаемой под континентальную кору Камчатки океанической плиты). Распределение сейсмогенных разломов в разрезе указывает на глубину возможного распространения трещин гидроразрыва в слэбе до глубин 250 км. Ориентация сейсмогенных разломов параллельно поверхности слэба (перпендикулярно минимальному эффективному напряжению) указывает на механизм их формирования в режиме гидроразрыва (возможные флюидные фазы: вода, нефть, газ). Высвобождающиеся в результате гидроразрыва в нижней и средней части слэба водные флюиды могут подниматься и действовать как ключевые ингредиенты последующего выплавления магмы в мантийном клине с обеспечением питания первичных магматических очагов активных вулканов.

### Заключение

Активность вулканов может быть эруптивной и магматической, режим их деятельности определяется геомеханическими условиями. В условиях горизонтального растяжения эруптивная продуктивность активных вулканов максимальна (Ключевской вулкан). В условиях горизонтального сжатия активные вулканы являются инжекторами воды и магмы в прилегающие геофлюидные резервуары, формируют высокотемпературные гидротермальные системы (Мутновский вулкан). Региональные сейсмогенные разломы Камчатки являются индикаторами генерации водных флюидов в слэбе в режиме гидроразрыва до глубин 250 км, обеспечивающими плавление мантийного клина и последующую вулканическую деятельность (рис. 1).

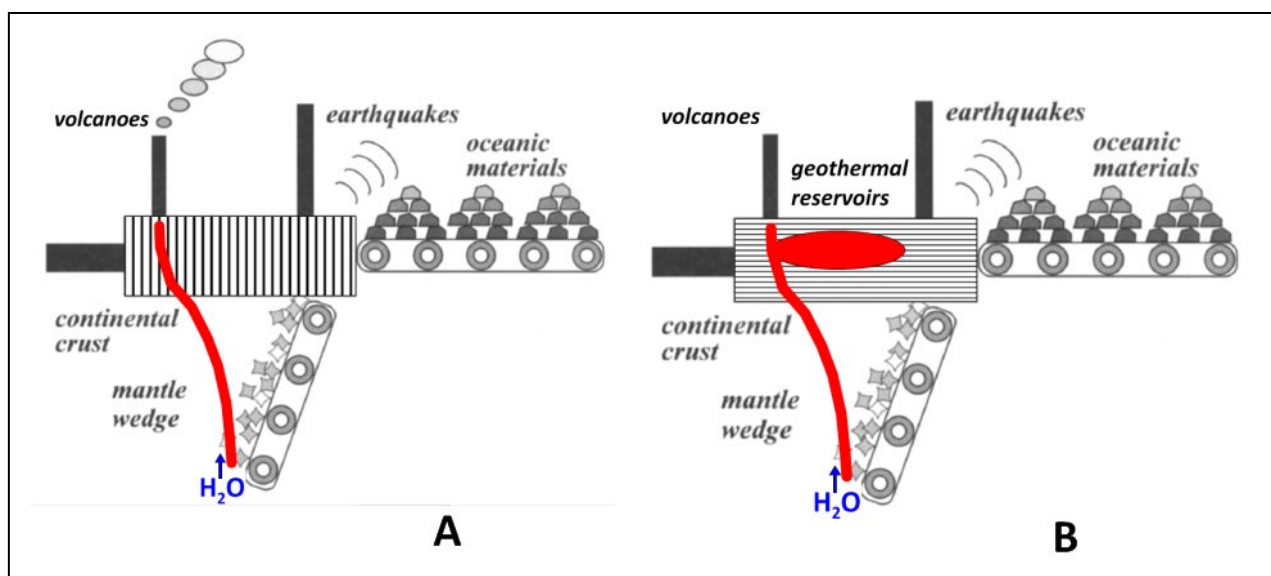


Рисунок 1 – Два режима вулканической деятельности: эруптивный (А) и магматический (В) в зависимости от геомеханических условий в континентальной коре. В режиме горизонтального растяжения коры транспорт магматической фазы в земной коре происходит в режиме вертикального гидроразрыва с формированием даек и обеспечением эруптивной продуктивности вулканов, в режиме горизонтального сжатия транспорт магмы сопровождается формированием горизонтальных трещин гидроразрыва (силлы), с аккумуляцией геотермальной энергии в коре и формированием продуктивных геотермальных месторождений. Примечание: в качестве концептуального фонового изображения использована модель «subduction factory» (Tatsumi Y., Kogiso T., 2003)

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ и JSPS в соответствии с исследовательским проектом № 21-55-50003.

### Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. / *А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин* // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 1–18.
2. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А. В. Кирюхин.* Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
3. *Озеров А.Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель / *А. Ю. Озеров.* М.: Геос, 2019. 306 с.
4. *Селянгин О.Б.* Мутновский вулкан, Камчатка: новые данные о структуре, эволюции и прогноз активности / *О.Б. Селянгин* // Вулканология и сейсмология. 1993. № 15. С. 17–38.
5. *Селянгин О.Б.* Удивительный мир Мутновского и Горелого вулканов / *О.Б. Селянгин* // Вулканонологический и туристский путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2009. 108 с.
6. *Федотов С.А.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях и глубинном строении / *С.А. Федотов, Н.А. Жаринов, Л.И. Гонтовая* // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
7. *Федотов С.А.* Сейсмические процессы и перемещение магм, происходившие при Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. и Трещинном Толбачинском извержении 2012–2013 гг. (п–овКамчатка) / *С.А. Федотов, Л.Б. Славина, С.Л. Сеньюков и др.* // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 11. № 1. С. 3–30.
8. *Condie K.* Earth as an Evolving Planetary System / *K. Condie.* Elsevier Academic Press. 2005. 447 p.
9. *Kiryukhin A.V.* Modeling Studies: Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia / *A.V. Kiryukhin* // Geothermics. Vol. 26, No.1. 1996. P. 63–90.
10. *Kiryukhin A.V.* Thermal-Permeability Structure and Recharge Conditions of the Mutnovsky High Temperature Geothermal Field (Kamchatka, Russia) / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, O.O. Usacheva et al.* // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. P. 36–55.
11. *Kiryukhin A.* Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations / *A. Kiryukhin, E. Chernykh, A. Polyakov et al.* // Geosciences. 2020. Vol. 10. P. 52. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10020052>.
12. *Kiryukhin A.V.* Magma Fracking and Production Reservoirs Beneath and Adjacent to Mutnovsky Volcano Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, P.O. Voronin et al.* // Geothermics. 2022. 105. 102474 .
13. *Koulakov I.* Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography / *I. Koulakov, E.I. Gordeev, N.L. Dobretsov et al.* // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. Vol. 263. P. 75–91.
14. *Koulakov, I.* Mantle and crustal sources of magmatic activity of Klyuchevskoy and surrounding volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography. / *I. Koulakov, N.M. Shapiro, C. Sens-Schönfelder et al.* // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. 125. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JB020097>
15. *Tatsumi Y.* The subduction factory: its role in the evolution of the Earth's crust and mantle / *Y. Tatsumi, T. Kogiso* // Intra-Oceanic Subduction Systems: Tectonic and Magmatic Processes. Geological Societ. London, Special Publications: LARTER, R.D. & LEAT, P.T., 2003. 219. P. 55–80.

## Геотермальная энергетика: технологии и перспективы развития

С.В. Алексеенко

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия  
asvasus@yandex.ru*

Среди наиболее перспективных видов возобновляемых источников энергии выделяется геотермальная энергия. Она подразделяется на гидрогеотермальную энергию (тепло подземных вод) и петротермальную энергию (тепло сухих пород Земли на глубинах от 3 до 10 км с температурой до 350 °С). Это наиболее экологически чистый источник энергии из всех остальных видов. Можно утверждать, что петротермальной энергии достаточно, чтобы навсегда обеспечить человечество энергией! Несмотря на очевидную привлекательность, вклад тепла Земли в мировую энергетiku пренебрежимо мал, что явно не соответствует его потенциалу. В данной статье выполнен анализ развития геотермальной энергетики с надеждой на преобладающий вклад этого вида энергии в будущем, особенно в связи с необходимостью принимать кардинальные решения в борьбе с изменением климата.

**Ключевые слова:** геотермальная энергия, петротермальная энергия, бинарные циклы

## Geothermal Energy: Technologies and Development Prospects

Sergey Alekseenko

*Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia*

Geothermal energy stands out among the most promising types of renewable energy sources. It is divided into hydrogeothermal energy (heat of groundwater) and petrothermal energy (heat of dry rocks of the Earth at depths from 3 to 10 km with temperatures up to 350 °C). It is the most environmentally friendly energy source of all other types. It can be argued that petrothermal energy is enough to provide humanity with energy forever! Despite the obvious attractiveness, the contribution of Earth's heat to world energy is negligible, which definitely does not correspond to its potential. In this paper, geothermal energy development analysis is presented hopefully for the predominant contribution of this type of energy in the future, especially due to the need to make drastic decisions in the fight against climate change.

**Keywords:** geothermal energy, petrothermal energy, binary cycles

### Введение

Энергетика – базис экономики любой страны вне зависимости от технологического уклада. Однако сегодня в обществе возникла беспрецедентная ситуация, когда необходимо безотлагательно принимать принципиальные решения по дальнейшему развитию мировой энергетики, что обусловлено экологическими проблемами. Наблюдаемый рост температуры поверхности Земли связывается с глобальным потеплением, основной причиной которого считаются выбросы парниковых газов – прежде всего, CO<sub>2</sub>. Полагается, что антропогенная эмиссия CO<sub>2</sub> играет ключевую роль, а главным виновником антропогенных выбросов объявлена энергетика на органическом топливе, поскольку ее вклад в выбросы парниковых газов составляет ¾. В числе разумных рекомендаций для решения экологических проблем находится освоение возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Среди наиболее перспективных видов ВИЭ выделяется геотермальная энергия, точнее ее составляющая в виде петротермальной энергии, то есть тепла сухих пород Земли на глубинах от 3 до 10 км с температурой до 350 °С. Это наиболее экологически чистый источник энергии из всех остальных видов. Можно утверждать, что петротермальной энергии достаточно, чтобы навсегда обеспечить человечество энергией! Несмотря на очевидную привлекательность, вклад тепла Земли в мировую энергетiku пренебрежимо мал, что явно не соответствует его потенциалу. В данной работе мы даем анализ развития геотермальной энергетики с

надеждой на преобладающий вклад этого вида энергии в будущем, особенно в связи с необходимостью принимать кардинальные решения в борьбе с изменением климата (Алексеев, 2022; Алхасов, 2008; DiPippo, 2005).

### **Источники и запасы геотермального тепла**

Источником геотермальной энергии являются как запасенное тепло с момента образования Земли, так и радиоактивность в земной коре. Континентальная кора, состоящая в основном из гранита и базальта, имеет толщину от 30 до 60 км и содержит значительное количество долгоживущих радиоактивных изотопов K, Rb, Th и U. Примерно 60% потока тепла, которое выходит из поверхности земли на континентах, образуется в результате радиоактивного распада этих четырех элементов. Фоновый тепловой поток, формирующийся за счет запасенного тепла в ядре Земли, равен  $40 \text{ мВт/м}^2$ . Средний тепловой поток для всей планеты составляет  $87 \text{ мВт/м}^2$ . В коре Земли средний градиент температуры равен  $30 \text{ }^\circ\text{C/км}$ , а в местечке Larderello (Тоскана, Италия) на порядок выше  $-300 \text{ }^\circ\text{C/км}$ .

### **Мировой опыт освоения гидрогеотермального тепла**

На сегодняшний день для нужд энергетики масштабно используются только гидрогеотермальные ресурсы в виде подземной горячей воды и (или) пара. При достаточно высоких температурах теплоносителя производится электричество на геотермальных станциях (ГеоЭС). При температуре порядка  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  геотермальный теплоноситель используется для прямого теплоснабжения, а при более низких температурах необходимо применение тепловых насосов. Первое производство электроэнергии из геотермального пара было осуществлено в Лардерелло, Италия, в 1904 году. Масштабное использование ГеоЭС началось в 1960-х годах. В 2020 г. в 29 странах было произведено 95 098 ГВт ч при общей установленной мощности 15 950 МВт(э). Доля геотермальной энергии в установленной мощности ВИЭ всего лишь 0,6%, что пренебрежимо мало. Несомненным лидером по всем показателям являются США. Но если говорить о вкладе подземного тепла в национальную экономику, то здесь лидер – Исландия, где доля производства электроэнергии на ГеоЭС составляет заметную величину в 30%. В России установленная мощность ГеоЭС ничтожно мала – 82 МВт (э). Геотермальное тепло широко используется в системах теплоснабжения как напрямую, так и с помощью тепловых насосов. В 2015 году установленная мощность геотермального теплоснабжения в мире составила 70,3 ГВт (из них на долю геотермальных тепловых насосов приходится 50 ГВт, а на прямое отопление – 7,5 ГВт). В числе лидирующих стран: Китай (установленная мощность 17,9 ГВт), США (17,4), Швеция (5,6). Наибольший вклад в экономику геотермальное теплоснабжение вносит в таких странах как Исландия, Япония, Швеция, Швейцария, Тунис, Турция, США. В Исландии геотермальным теплом отапливается более 90% зданий, а в Швеции 20% зданий отапливается геотермальными тепловыми насосами. Наибольшее число тепловых насосов установлено в США – 2 млн. в 2020 (28 млн. – в планах к 2050 г.). Одна из основных проблем использования термальных вод – их высокая минерализация, которая достигает 200 г/л. В результате имеют место интенсивные процессы загрязнения и коррозии оборудования. Однако рассолы разных месторождений могут содержать ценные химические вещества (литий, рубидий, цезий, бром, калий и другие), которые можно извлекать в промышленных масштабах.

### **Петротермальная энергия**

Вне сомнений наибольшие перспективы в развитии будущей геотермальной энергетики связаны с освоением петротермальной энергии – глубинного тепла, которое сосредоточено в сухих породах на технически доступных глубинах от 3 до 10 км. Впервые идея извлечения геотермальной энергии твердых горячих пород была высказана К.Э. Циолковским в 1897 г. Принцип утилизации петротермальной энергии довольно простой. По нагнетательной скважине холодная вода поступает в резервуар из проницаемых горячих сухих пород, нагревается, выходит на поверхность земли через добычные скважины и затем поступает в виде горячей воды или пара на электрическую станцию. Из ГеоЭС вода вновь



возвращается в нагнетательную скважину, тем самым создавая замкнутую циркуляционную систему (ГЦС). Естественная проницаемость на больших глубинах встречается редко. Поэтому возникает необходимость создания искусственного проницаемого резервуара. В 1970 г. в Лос-Аламосской национальной лаборатории США была предложена ГЦС с искусственным коллектором из вертикальных трещин, создаваемых путем гидроразрыва в монолите. Этот проект получил название HDR (Hot Dry Rock), то есть горячие сухие породы. Он выполнялся в местечке Фентон-Хилл в 1973–1996 годах. Из-за ряда проблем в последующем пошли по пути создания обширных резервуаров с множеством трещин, возникающих путем стимулирования естественных дефектов. Такие проекты называются Enhanced Geothermal Systems (EGS) – усовершенствованные геотермальные системы. Всего было реализовано около двадцати опытных систем типа HDR или EGS, которые подтвердили техническую возможность извлечения глубинного тепла с глубин до 5,1 км. Из анализа Enhanced Geothermal Systems можно сформулировать следующие выводы. Типичные EGS должны удовлетворять таким требованиям: глубина скважин более 3 км; генерируемая мощность около (3–10) МВт; температура в резервуаре более 250 °С; расход воды 50–100 кг/с; срок эксплуатации более 25 лет; расстояние между скважинами 0,5–2 км; объем подземного проницаемого резервуара 0,1–0,3 км<sup>3</sup>. Существует ряд технических проблем, наиболее существенные из которых: (а) высокая цена бурения (экспоненциальный рост с глубиной) и (б) создание подземного резервуара с достаточной проницаемостью. Так, для EGS более 60% от общих капитальных затрат может приходиться на бурение, а цена бурения скважины глубиной 10 км оценивается в (1–2) млрд. руб. Зато есть неоспоримые преимущества петротермальной энергетики, каких нет у других источников энергии:

- Непрерывное производство энергии;
- Добывать можно в любом месте Земли;
- Возобновляемый источник энергии (ВИЭ);
- Нет экологических последствий;
- Отсутствие эмиссии газов, в т.ч. CO<sub>2</sub>;
- Не надо хранить первичную энергию;
- Не надо много земли;
- Неисчерпаемый источник энергии;
- Дешевый источник энергии.

На примере США показано, что петротермальной энергии только на глубинах до 10 км хватит при использовании усовершенствованных технологий на 20 000 лет даже без учета ее возобновления. Отсюда следует глобальный вывод: петротермальной энергии достаточно, чтобы навсегда обеспечить человечество энергией (с учетом конечного времени существования цивилизаций). Продемонстрировано, что к 2030 г. возможно достичь нормированной себестоимости (LCOE) до 6 ¢/kWh за петротермальную энергию, что находится на уровне самых низких показателей для энергетического сектора.

### **Способы утилизации геотермального тепла**

В случае сухого пара схема генерации электроэнергии наиболее простая – пар из скважины после очистки подается в паровую турбину, затем конденсируется и возвращается под землю. Основные проблемы связаны с коррозией оборудования. Для жидкой или двухфазной среды технические решения организации системы преобразования тепловой энергии геофлюида в электроэнергию в значительной степени определяются его температурой и подразделяются на технологии Flash, где осуществляются процессы сепарации пара (одно-, двух- или трехстадийные), и бинарные циклы. В последних реализуется органический цикл Рэнкина (ОЦР), как принято называть цикл Рэнкина с использованием неводных рабочих тел. В случае бинарной геотермальной станции геотермальный флюид из геотермальной скважины с помощью насоса через песчаный фильтр подается в теплообменник – испарительную систему. В этом устройстве энергия геотермального флюида передается легкокипящей рабочей жидкости, например, фреону.

Пары рабочей жидкости приводят во вращение турбину с электрогенератором. Отработанный пар попадает в конденсатор, где происходит переход его в жидкость, которая насосом подается в нагреватель. Количество бинарных станций наиболее быстро растет в сравнении с другими типами геотермальных станций. Они являются наиболее перспективными не только для геотермальной энергетики, но и для других отраслей промышленности, где требуется утилизация низкопотенциального тепла, поскольку возможна генерация энергии даже для случая температур порядка 70 °С. В 1967 г. был реализован первый в мире геотермальный бинарный энергоблок на Паратунской геотермальной опытно-промышленной электростанции (разработка Института теплофизики СО АН СССР). Бинарная установка имела мощность 750 кВт; использовался фреон R12; температура сепарата составила 80 °С. В целом по бинарным циклам следует сказать следующее. Существует огромное количество потенциальных кандидатов в рабочие жидкости ОЦР (многие десятки), но лишь ограниченное их число используется в коммерческих целях. Предпочтение отдается так называемым «изэнтропийным», а также «сухим» рабочим телам. В силу наличия множества критериев отбора рабочих тел и широкого спектра условий, не существует универсальных рабочих тел типа воды в теплоэнергетике. В каждом конкретном случае необходимо выполнять многовариантные оптимизационные исследования, чтобы осуществить подходящий выбор рабочих тел, технологических схем и режимов эксплуатации.

### **Выводы и предложения**

Геотермальная энергия – самый экологически чистый и практически неисчерпаемый источник энергии. Для ее масштабного применения, особенно в свете перехода на «зеленую» энергетику, необходимо решение следующих ключевых задач:

- Развитие и масштабное применение геотермальных тепловых насосов.
- Преимущественное развитие бинарных циклов, в том числе для задач энергосбережения.
- Освоение глубинного тепла на базе EGS, как самого перспективного вида геотермальной энергии.
- Извлечение из термальной воды ценных химикатов, особенно редкоземельных элементов.
- Развитие новых эффективных технологий бурения, которые могут иметь революционное значение не только для геотермальной энергетики, но и многих других отраслей промышленности.
- Разработка и применение геофизических методов диагностики.
- Для реализации указанных задач необходимо:
  - Разработать дорожную карту развития геотермальной и петротермальной энергетики в России.
  - В кратчайшие сроки представить в Совет по приоритетному направлению «Энергетика» заявку на Комплексную научно-техническую программу (КНТП) полного инновационного цикла: «Технологии геотермальной энергетики».

### **Список литературы**

1. *Алексеев С.В.* Геотермальная энергия / *С.В. Алексеев* // 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет. Москва, 2022. С. 147–167.
2. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика. Проблемы, ресурсы, технологии / *А.Б. Алхасов; ред. Э.Э. Шпильрайн.* М.: Физматлит, 2008. 375 с.
3. *DiPippo, R.* Geothermal power plants. Principles, applications, and case studies / *R DiPippo.* Oxford, England: Elsevier, 2005. 450 p.

## Энергетические установки на базе использования геотермальных источников энергии

Н.Н. Ефимов<sup>1</sup>, В.И. Паршуков<sup>1</sup>, А.С. Ощепков<sup>1</sup>, А.В. Рыжков<sup>1</sup>, Э.Е. Блохин<sup>2,3</sup>,  
Л.Н. Фисенко<sup>3</sup>, А.Ю. Черкесов<sup>4</sup>, И.В. Русакевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО НПП «Донские технологии», Россия

<sup>2</sup>ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр  
Российской академии наук» (ЮНЦ РАН), Россия  
holele@mail.ru

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова», Россия

<sup>4</sup>ООО НПП «ЭКОФЕС», Россия

Важным аспектом, тормозящим экономическое и социальное развитие малонаселенных регионов России, является их недостаточно развитая инфраструктура, особенно в части энергоснабжения. К наиболее перспективным направлениям развития энергетики этих регионов относится производство электрической и тепловой энергий на базе ВИЭ и особенно – геотермальных ТЭС.

**Ключевые слова:** энергоснабжение удаленных районов, геотермальная энергетика, паровая микротурбина, контейнерное исполнение энергокомплекса, утилизация сероводорода, распределенная энергетическая система

## Power plants based on the use of geothermal energy sources

Nikolai Efimov<sup>1</sup>, Vladimir Parshukov<sup>1</sup>, Andrei Oshchepkov<sup>1</sup>, Anton Ryzhkov<sup>1</sup>, Eduard Blokhin<sup>2,3</sup>,  
Lev Fisenko<sup>3</sup>, Arkadii Cherkesov<sup>4</sup>, Irina Rusakevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LLC RPE «Don Technologies», Russia

<sup>2</sup>FSBIS «Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of The Russian Academy of Sciences», Russia

<sup>3</sup>FSBEI of HE «South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov», Russia

<sup>4</sup>LLC RPE «ECOFES», Russia

An important aspect hindering the economic and social development of the sparsely populated regions of Russia is their underdeveloped infrastructure, especially in terms of energy supply. And the most promising areas for the development of the energy sector in these regions include the production of electrical and thermal energy based on renewable energy sources and, especially, geothermal thermal power plants.

**Keywords:** power supply to remote areas, geothermal energy, steam microturbine, container design of the energy complex, hydrogen sulfide utilization, distributed energy system

### Введение

Развитие удаленных и труднодоступных регионов России невозможно без развития энергетики. План по сохранению и увеличению численности населения Дальнего Востока и Крайнего Севера не будет осуществлён без создания условий для населения. Как показала практика реализации Программы «Дальневосточный гектар», одним из главных критериев при выборе участка для заявителя является именно бесперебойное энергоснабжение. Как следствие, подано только 100 тыс. заявок на получение земли и все они на участки, которые находятся рядом с крупными агломерациями. Одним из приоритетов программы «Дальневосточный гектар» является создание компактных поселений. Это территории с максимальной концентрацией предоставленных земельных участков. Предусмотрено содействие в обустройстве территории посредством строительства объектов коммунальной, транспортной, социальной инфраструктур.

Сегодня для энергообеспечения населенных пунктов на малоосвоенных территориях преобладающим преимуществом пользуются дизельные энергоустановки, обладающие

рядом недостатков: высокой себестоимостью производства электроэнергии (от 20 руб./кВт·ч), зависимостью от наличия топлива, доставляемого Северным завозом, малым моторесурсом, высокой экологической нагрузкой и т.д. Для снижения влияния этих недостатков появляются проекты ДЭС, совмещенных с агрегатами ВИЭ (Змиева, 2020). Другое направление – энергообеспечение труднодоступных районов за счет сжиженного природного газа (СПГ), на котором работают ГТУ и ГПУ, находится на начальной стадии развития. Сегодня большая часть произведенного в России СПГ идет на экспорт (Деловой журнал Нефтегаз, 2022).

Часть регионов Дальнего Востока являются территориями с высокопотенциальными геотермальными ресурсами (Рис. 1). В целом Россия обладает значительными геотермальными ресурсами: их технический потенциал оценивается в 11869 млн. т.у.т. в год. Освоение этого потенциала даст толчок для экономического и демографического роста на территориях Камчатки, Курильских островов, Забайкалья, Урала, Северного Кавказа. В нашей стране работает три геотермальных электростанции, расположенные на Камчатке: Паужетская, Верхне-Мутновская и Мутновская и на о. Кунашир – Менделеевская ГеоТЭС (Деловой журнал Нефтегаз, 2022).

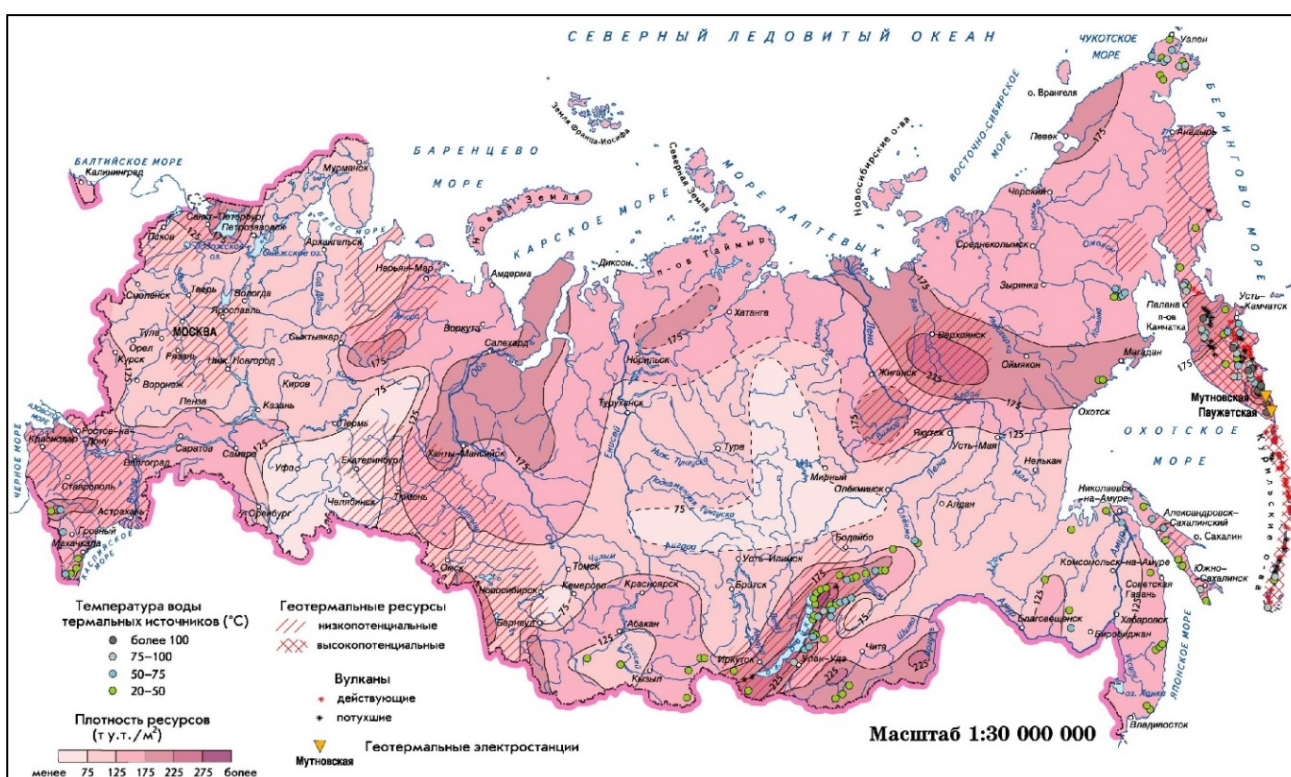


Рисунок 1 – Потенциал геотермальной энергии РФ

Техническое предложение. Регионы, на территории которых возможно использование геотермальной энергии подчас представляют собой малообжитую местность с минимальной плотностью населения, сконцентрированных в небольших удаленных поселениях. Также эти территории часто входят в число особо охраняемых территорий: заповедников и заказников. Строительство крупного энергетического объекта в этих районах не только не разрешено, но и не рационально в условиях отсутствия крупных потребителей. Малые модульные ГеоТЭС от 10 кВт до 1 МВт электрической и от 60 кВт до 10 МВт тепловой мощности могут найти здесь куда более широкое применение: отопление и непрерывное электроснабжение разбросанных по малодоступным территориям поселков, туристических стоянок, лесничеств и т.д.

### Энергомодуль для низкотемпературных геотермальных источников

Консорциум отечественных предприятий, под управлением ООО НПП «Донские технологии», имеет опыт создания модульных энергетических комплексов контейнерного исполнения на базе паровых микротурбин (Рис. 2) для малой распределённой энергетики на

параметры пара с давлением до 1,0 МПа и температурой до 200 °С мощностью до 250 кВт (Рыжков и др., 2020, Паршуков и др., 2019, Паршуков и др., 2018) . Такие характеристики пара вполне могут быть использованы для геотермальной энергетики.



Рисунок 2 – Контейнерное исполнение модульного энергетического комплекса по переработке ТКО электрической мощностью 30 кВт

Как показывают расчеты, паровые микротурбины могут быть спроектированы и на более низкие температуры рабочей среды на входе в турбину (менее 120 °С). Расчет вариантов и характеристик паровых микротурбин для энергетического модуля геотермальной установки приведены в (Таблице 1).

Таблица 1. Результаты расчёта турбины с однопоточной центростремительной ступенью

Показатель	Варианты				
	2	5	30	50	250
Модель					
Начальное давление $p_0$ , МПа	0,17	0,3	0,6	1,0	1
Температура на входе $t_0$ , °С	116	134	159	180	180
Конечное давление $p_k$ , МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Расход пара $G$ , кг/с	0,0402	0,0753	0,146	0,342	1,387
Частота вращения, $n$ , 1/с	200	200	200	200	200
Относительный внутренний КПД $\eta_{oi}$	0,537	0,4048	0,526	0,606	0,5113
Использованный теплоперепад ступени, $H_i$ , кДж/кг	48,4	75,7	213,8	220,2	199,7
Мощность источника энергии, $N_{нар}$ , кВт	91,8	173,9	341,8	581,4	3272
Мощность сетевого подогревателя-конд. $N_{сп}$ , кВт	89,853	168,2	310,6	552,3	3140
Абсолютный КПД по выработке электроэнергии, $\eta_{э}$	0,0191	0,0315	0,0878	0,086	0,0764
Электрическая мощность турбины, $N_{э}$ , кВт	1,76	5,5	30,0	50,1	250

Исполнение энергомодуля в 20-футовом контейнере позволяет произвести сборку на заводе-изготовителе, доставить к месту расположения термальных скважин любым из имеющихся видов транспорта, произвести быстрый монтаж на свайном фундаменте.

На (Рис. 3) приведена схема энергетического модуля 30 кВт, разработанного, изготовленного и используемого группой предприятий-разработчиков в опытном образце технологического комплекса по переработке хвостов сортировки ТКО. Микротурбинный модуль, использованный в этой схеме, может быть использован в составе энергоблока бинарной ГеоТЭС.

Энергетические комплексы электрической мощностью 2 и 5 кВт могут найти применения для энергоснабжения кордонов лесной охраны на ООПТ или спасательные модульные пункты обогрева. Комплексы мощностью 30–250 кВт способны питать малые поселения, фермерские хозяйства, промышленные объекты. За счет блочно-модульного исполнения при необходимости в каскаде они могут составлять ГеоТЭС от 500 кВт и выше.

Применение энергетических модулей на базе паровых микротурбин позволит локализовать выработку электрической и тепловой энергии в месте потребления. По сравнению с ГеоТЭС мощностью от нескольких МВт и выше значительно сократить число скважин, протяженность скважинных трубопроводов, и трубопроводов теплоснабжения, а вместе с тем и теплопотери; потери электрической энергии при передаче и трансформации, в разы сократить площадь отчуждаемых земель.

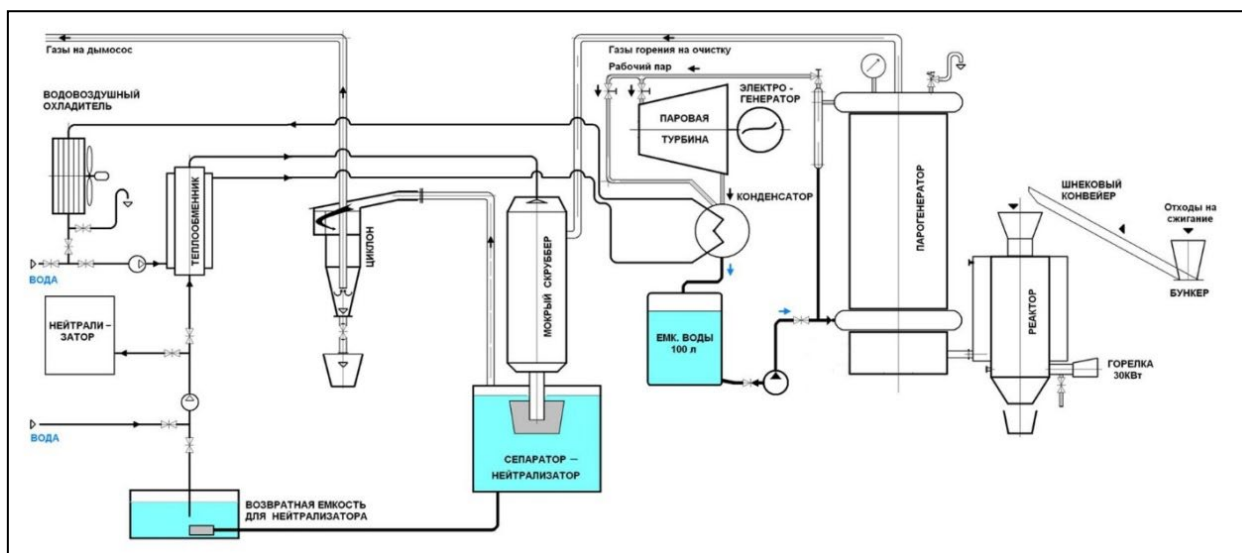


Рисунок 3 – Схема энерготехнологического комплекса на базе микротурбины ООО НПП «Донские технологии» мощностью 30 кВт

Дополнительное оборудование. В случае использования на ГеоТЭС прямой схемы получения пара необходимо разработать сепараторы, устанавливаемые перед турбиной. При использовании геотермальных источников тепла с температурой не более 120 °С для теплоснабжения потребует разработки специальных коррозионностойких теплообменников. Поскольку такие источники обладают большой минерализацией, то потребуются разработки теплообменников из фторопластовых труб, которые выдерживают температуру до 250 °С и давление до 1,0 МПа, и в то же время не подвержены коррозии. При необходимости использования пара более высоких температур (например, до 300 °С) потребуются разработки энергоустановки на органическом топливе для перегрева рабочей среды до требуемой температуры.

### Обезвреживание сероводорода

Немаловажной задачей при разработке геотермальной станции является вопрос утилизации и обезвреживания сероводорода, попадающего из скважины в тепловую схему вместе с пароводяной смесью. В составе разработчиков, в рамках комплексного проекта, принимает участие ООО НПП «Экофес», коллектив которого имеет большой опыт по созданию различных систем очистки воды. Ими предложен один из наиболее эффективных методов обезвреживания сероводорода в низкотемпературных геотермальных скважинах (Фесенко и др., 2022, Фесенко и др., 2021). Метод предусматривает: очистку парогазовой смеси от газообразного и растворенного сероводорода ( $H_2S_r$  и  $\sum H_2S$  соответственно) с применением соединений железа; регенерацию железосодержащих реагентов; получение товарной серы в качестве побочного продукта.

Принципиальная схема метода представлена на (Рис. 4) и включает 5 блоков.

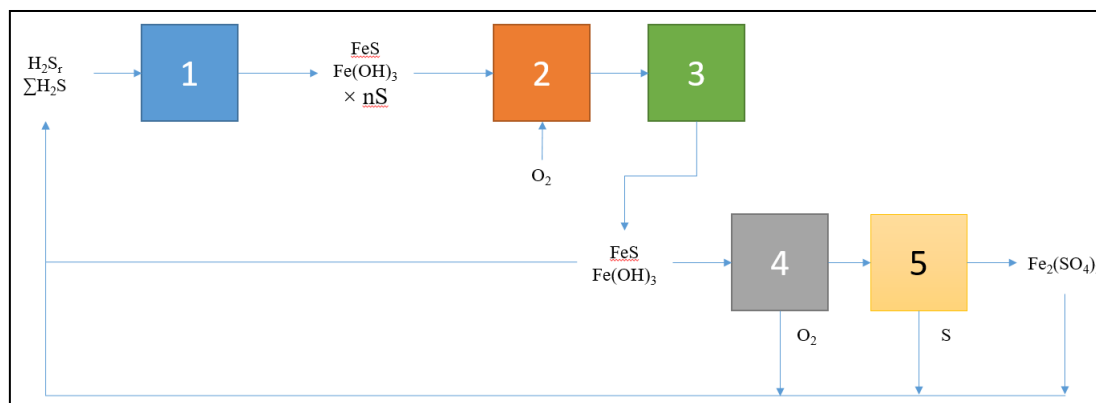


Рисунок 4 – Принципиальная схема обезвреживания сероводорода

Блок 1 – абсорбент (распылитель), реализующий контакт сероводородсодержащей парогазовой смеси с суспензией  $Fe(OH)_3$  и раствором  $Fe^{3+}$  с целью связывания  $H_2S_r$  и  $\Sigma H_2S$  в труднорастворимый сульфид железа  $FeS$ . Соединения железа дозируются в блок 1 в 3-кратном избытке по отношению к стехиометрической дозе сероводорода. В этом случае реализуется технологически приемлемая скорость связывания сероводорода в  $FeS$  и его окисления в блоке 2. Функции блока 1 выполняет устройство типа трубы Вентури с форсунками для введения суспензии.

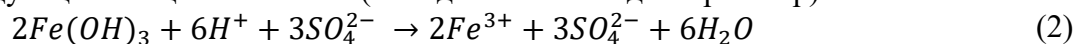
Блок 2 – сооружения и устройства, реализующие контакт суспензии  $FeS + Fe(OH)_3 \times nS$  с воздухом и проведение реакции окисления  $FeS$  кислородом воздуха до молекулярной серы  $S$  и гидроксида железа  $Fe(OH)_3$ . При этом соединения железа выполняют роль катализатора и коагулянта, способствующего уменьшению дисперсности и агрегативной устойчивости суспензии  $Fe(OH)_3 \times nS$ . Функции блока 2 выполняют сооружения типа реакторов-окислителей с барботированием конденсата воздухом или кислородосодержащей смесью газов.

Блок 3 – предназначен для удаления из конденсата труднорастворимых соединений серы и железа  $Fe(OH)_3 \times nS$ . Образующийся при этом конденсат не содержит сероводорода и взвешенных веществ и может быть использован для технических целей.

Блок биорегенерации железа (4) – аэрационные емкости, предназначенные для бактериального окисления серы до серной кислоты



С последующим выщелачиванием (выведением из осадка в раствор) железа:



Блок отделения осадка (5) – отстойники и центрифуги, предназначенные для извлечения остаточной серы из раствора  $Fe_2(SO_4)_3$  который направляется в блок 1 технологии.

Применяя данную схему, можно добиться выделения сероводорода в газовую фазу без подкисления воды; получения товарной серы, которую можно в дальнейшем использовать для утилизации технических отходов; отсутствия технологических выбросов в окружающую среду, что особенно важно для локальных мест установки блочно-модульных ГеоТЭС

### Система управления локальными ГеоТЭС

Блочно-модульное размещение отдельных малых и микро- ГеоТЭС на большой территории предполагает создание распределенной энергетической системы, имеющей усложненную схему управления потоками электрической и тепловой энергии. У двух исполнителей в составе Консорциума – ООО ИТЦ «ДонЭнергоМаш» и АО «НТЦ ФСК ЕЭС» имеет результативный опыт создания АСУ MicroGrid. Коллективом разработан программный комплекс (Рабинович и др., 2022, Потапенко и др., 2022) полностью на базе российского программного обеспечения, реализующий функции АСУ локальной интеллектуальной энергосистемы (Паршуков и др., 2020, Паршуков и др., 2022), включающей собственные источники электрической и тепловой энергии (в том числе и ВИЭ) и способной обеспечить бесперебойное энергоснабжение распределенных потребителей независимо от наличия и качества центральной системы, климата, времени года, суток и погоды.

### Список литературы

1. Змиева К.А. Проблемы энергоснабжения арктических регионов / К.А. Змиева // Российская Арктика. 2020. № 8. С. 5–14.
2. Карта российской СПГ отрасли 2022. Деловой журнал Нефтегаз.RU. 2022. № 4. С. 50-61 <https://magazine.naftegaz.ru/articles/spg/733414-karta-rossiyskoy-spg-otrasli-2022/>
3. Бутузов В.А. История и проблемы развития геотермальной энергетики в России / В.А. Бутузов // Окружающая среда и энергетика. 2019. № 4 (4). С. 4–19.

4. *Рыжков А.В.* Энерготехнологический комплекс по переработке отходов. Результаты пусконаладочных работ и экспериментальной апробации технологии / *А.В. Рыжков, А.С. Ощепков, Д.С. Католиченко и др.* // Энергосбережение. 2020. № 8. С. 46–49.
5. *Паршуков В.И.* Энерготехнологические комплексы для автономного энергоснабжения на основе технологий переработки отходов / *В. И. Паршуков, А.В. Рыжков* // Энергосбережение. 2019. № 5. С. 50–53.
6. *Паршуков В.И.* Энергетические комплексы тригенерации на основе технологий переработки отходов / *В.И. Паршуков, В.К. Иконников, Н.Н. Ефимов и др.* // Энергосбережение. 2018. № 1. С. 43–49.
7. *Фесенко Л.Н.* Исследование продолжительности регенерации гидроксида железа (iii) в статических условиях при железо-каталитическом окислении сероводорода природных вод / *Л.Н. Фесенко, А.Ю. Черкесов, С.А. Щукин и др.* // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии. Сборник статей 79-ой всероссийской научно-технической конференции. Под ред. *М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова.* Самара, 2022. С. 644–653.
8. *Фесенко Л.Н.* Исследование электрохимического окисления сероводородсодержащих газовых смесей летучих углеводородов / *Л.Н. Фесенко, А.Ю. Черкесов, Р.В. Исраилов* // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8 (80). С. 391–407.
9. *Рабинович М.А.* OPTCHANGE: Программа оптимизации обмена активной мощностью магистральной и распределительной сети с учетом ценовых показателей / *М.А. Рабинович, Ю.И. Моржин, С.П. Потапенко и др.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022613362, 14.03.2022. Заявка № 2022612622 от 28.02.2022.
10. *Потапенко С.П.* ASULIES: Имитационная модель автоматизированной системы управления локальной интеллектуальной электрической сетью / *С.П. Потапенко, А.В. Демура.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022614784, 25.03.2022. Заявка № 2022613684 от 16.03.2022.
11. *Паршуков В.И.* Концепция локальной интеллектуальной энергетической системы / *В.И. Паршуков, А.В. Рыжков, А.В. Демура* // Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов ХLI международной научно-технической конференции. 2020. С. 59–62.
12. *Паршуков В.И.* Интеллектуальный гибридный энергоцентр / *В.И. Паршуков, Э.Е. Блохин, А.В. Рыжков* // Энергосбережение. 2022. № 3. С. 35–41.



## РАЗДЕЛ II. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

### CHAPTER II. HYDROTHERMAL SYSTEMS OF VOLCANIC REGIONS

УДК 550.36(092)

#### **Виктор Михайлович Сугробов. К 90-летию со дня рождения**

**М.В. Кузнецова, А.В. Кирюхин**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
bib@kscnet.ru*

Статья посвящена жизни и научной деятельности Виктора Михайловича Сугробова – одного из ведущих специалистов нашей страны в области гидрогеологии и геотермии вулканических областей.

**Ключевые слова:** В.М. Сугробов, гидротермальные системы Камчатки, Долина Гейзеров

#### **Dedicated to the 90th anniversary of Viktor Mikhailovich Sugrobov**

**Marina Kuznetsova, Alexey Kiryukhin**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

The article describes scientific activities of Viktor Mikhailovich Sugrobov, who known in our country as one of the leading specialists in hydrology and geothermometry of volcanic areas.

**Keywords:** V.M. Sugrobov, hydrothermal systems of Kamchatka, The Valley of Geysers

Виктор Михайлович Сугробов родился 25 декабря 1932 г. в небольшом городе Ярцево Смоленской области. В 1951–1956 гг., после окончания средней школы, он учился в



Рисунок 1 - В. М. Сугробов

Московском геологоразведочном институте им. С. Орджоникидзе на гидрогеологическом факультете. После завершения учебы, Виктор Михайлович четыре года работал в Лаборатории гидрогеологических проблем Московского геологоразведочного института АН СССР, где занимался изучением условий формирования подземных вод Западной Сибири. Результат исследований был изложен в научном отчете и коллективной монографии «Подземные воды юга Западно-Сибирской низменности и условия их формирования» (1961).

По предложению С. И. Набоко, в 1960 г., Виктор Михайлович перешел на работу в Лабораторию вулканологии АН СССР для работы, по крайней мере, в течение трех лет на Камчатке, а точнее на Паужетке, контрольно-наблюдательной геотермической станции (КНС) Лаборатории (Сугробов, 2012). Здесь он работал начальником гидрогеологического отряда, а с 1962 г. – возглавил Паужетскую геотермальную экспедицию.

В.М. Сугробов один из активных участников и руководителей комплексных исследований Паужетского геотермального месторождения на Камчатке с целью обоснования строительства первой в нашей стране геотермальной электростанции (Рис. 2). В 1962–1963 гг., по предложенному им методу опытно-эксплуатационных выпусков пароводяной смеси, были

проведены годовые опытно-эксплуатационные выпуски из 10 наиболее производительных скважин, по данным которых был выполнен подсчет, затем утверждены эксплуатационные запасы, обосновывающие строительство геотермальной электростанции мощностью 5 МВт. В 1964–1965 гг. Виктор Михайлович выполнил оценку выноса тепла на термальных полях Камбального хребта и прогнозную оценку геотермальных ресурсов Паужетской гидротермальной системы (Сугробов и др., 2016). Виктор Михайлович Сугробов – соавтор коллективной монографии «Паужетские горячие воды на Камчатке» (1965), являющейся в нашей стране первой работой в области изучения геотермальных месторождений и их использования в теплоэнергетике. В работе освещены некоторые аспекты практического использования гидротерм, методики их изучения и разведки на примере Паужетского месторождения (Сугробов соавтор, 1976).



*Рисунок 2 – Закладка фундамента Паужетской ГеоТЭС*

По результатам пятилетних исследований на Камчатке, в 1967 году В.М. Сугробов успешно защищает кандидатскую диссертацию «Паужетская гидротермальная система на Камчатке (в связи со строительством геотермальной электростанции)». В кандидатской диссертации на основе детального анализа гидрогеологических условий Паужетской гидротермальной системы и изучения режима высокотермальных вод была выполнена количественная оценка ресурсов парогидротерм, даны рекомендации и прогноз увеличения запасов месторождения за счет освоения юго-восточных флангов, вскрытия более высокотемпературного теплоносителя, обеспечивающего работу геотермальной станции мощностью 30 МВт.

В 1965–1968 гг. В.М. Сугробов работал в Геологическом институте АН СССР. В 1968 году Виктор Михайлович вернулся на работу в Институт вулканологии СО РАН (ныне Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский) и был назначен заведующим Лабораторией гидрогеологии и геотермии. С 1972 г. В.М. Сугробов заведовал Отделом геотермии и геохимии, а с 1978 г. был также и заместителем директора Института вулканологии ДВНЦ АН СССР по науке.

В Институте вулканологии он продолжает исследования закономерностей геотермального поля в области современного вулканизма, особенностей теплового режима гидротермальных систем и работает над прогнозной оценкой геотермальных ресурсов Камчатки.

В.М. Сугробовым была детально исследованы Северо-Парамуширская высокотемпературная гидротермальная система в геозащитных целях и Гейзерная гидротермальная система, режим гейзеров Камчатки, выполнена прогнозная оценка геотермальных ресурсов. Сведения о наиболее крупных высокотемпературных системах и термальных полях Камчатки, полученные в результате их экспедиционного обследования, проведенного Институтом вулканологии, содержит книга «Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки» (Сугробов соавтор, 1976). Основной упор в работе сделан на систематизацию фактического материала по геологии, геотермии и гидрохимии термоаномалий.

В монографии «Модели теплопереноса в гидротермальных системах Камчатки» (соавтор А. В. Кирюхин), опубликованной в 1987 г., для объяснения гидрогеотермических условий формирования Паужетской, Мутновской и Кошелевской гидротермальных систем, а также термоаномалий, приуроченных к кратерам вулканов использованы модели теплопереноса. Для наиболее изученной – Паужетской – с помощью моделирования выполнен прогноз теплового режима для различных вариантов ее разработки, рассмотрены вопросы прогноза производительности пароводяных скважин и оценки эксплуатационных запасов.

Для изучения естественного режима термальных вод и гидрогеологических эффектов сейсмичности, в том числе предвестников землетрясений, по инициативе В.М. Сугробова были организованы регулярные гидрогеологические наблюдения в Долине Гейзеров и в Елизовском районе на Пиначевской площади (Сугробов, 2012).

Уникальное явление природы – гейзеры и условия их появления в Долине гейзеров на Камчатке всесторонне охарактеризовано в научно-популярном очерке «Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров» (2009, В.М. Сугробов и др.).

Под научным руководством и непосредственном участии В. М. Сугробова была выполнена оценка ресурсов Мутновской системы и Мутновского геотермального месторождения, ставшего базой второй крупной геотермальной электростанции. Опыт разработки и применения комплекса нетрадиционных геолого-геофизических и геохимических методов исследований при поисках и разведке Мутновского геотермального месторождения обобщен в монографии «Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм» (1986, В.М. Сугробов соавтор).

По инициативе В.М. Сугробова начались исследования теплового потока Камчатки и прилегающих морских акваторий. В монографии «Тепловой режим недр СССР» (1970, В.М. Сугробов соавтор) освещена взаимосвязь различных направлений геотермических исследований и возможность их приложения к изучению земной коры и верхней мантии Земли.

В.М. Сугробов участвовал в двух геотермических рейсах научно-исследовательского судна «Вулканолог». В ходе исследований был измерен тепловой поток и составлена карта измеренного и фонового теплового потока для Курило-Командорского региона и, совместно со Смирновым Я.Б., для части СЗ сектора Тихого океана и установлена зона резко нестационарного теплового поля в областях современного вулканизма на островных дугах северо-западной части Тихого океана, выявлена связь величин теплового потока с мощностью земной коры, показывающая, что чем выше величины теплового потока, тем меньше мощность земной коры в зонах перехода от континента к океану. Также было доказано, что максимальные температуры и минимальная мощность литосферы характерны для геосинклинальных впадин окраинных морей. Полученные данные были включены в «Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана» (2003, В.М. Сугробов соавтор).

Он был одним из инициаторов работы по обоснованию возможности использования тепловой энергии магматического очага Авачинского вулкана для тепло-электроснабжения

г. Петропавловска-Камчатского и им впервые была выполнена оценка геотермальных ресурсов неглубокозалегающих промежуточных магматических очагов вулканов Камчатки.

Свой богатый опыт и знания В.М. Сугробов охотно передавал молодым, воспитав целую плеяду продолжателей своих идей. Под его научным руководством были защищены 6 кандидатских диссертаций, а два его ученика (А.В. Кирюхин, Г.Н. Копылова) стали впоследствии докторами наук. В течение многих лет В.М. Сугробов курировал геотермические и частично геохимические публикации в журнале «Вулканология и сейсмология» и, в качестве редактора, подготовил к печати 17 книг.

В разное время Виктор Михайлович участвовал в работе международных научных организаций: был членом комиссии по тепловому потоку (1979–1983 гг.), членом исполкома Международной ассоциации вулканологии и химии недр Земли (1987–1991 гг.). Научная, научно-организационная деятельность В.М. Сугробова отмечена орденом «Дружбы народов» (1983), бронзовой медалью ВДНХ (1984), Почетными грамотами Президиума РАН, Президиума ДВО РАН, администрации Камчатской области, Института вулканологии (ИВиС ДВО РАН), юбилейными медалями. В 2004 году, после успешного запуска в эксплуатацию Мутновских ГеоЭС мощностью 62 МВт, В.М. Сугробов в составе коллектива ученых и специалистов был награжден Государственной премией Российской Федерации по науке и технике за фундаментальные исследования в области геотермальной энергетики и создание на их основе геотермальных электрических станций.

Виктор Михайлович Сугробов оставил заметный и значимый след в отечественной геотермии. Он **первый** предложил применительно к месторождениям высокотемпературных подземных вод метод опытно – эксплуатационных выпусков пароводяной смеси для подсчета и обосновал применение гидродинамического метода расчета. В.М. Сугробовым **впервые** была выполнена оценка геотермальных ресурсов периферических магматических очагов вулканов Камчатки. При его участии **впервые** была дана оценка общего выноса тепла (в удельном выражении) в основных тектонических зонах Камчатки и установлена нестационарность теплового поля в областях современного вулканизма на островных дугах СЗ части Тихого океана (Вестник КРАУНЦ, 2007).

Многие сотрудники нашего института помнят этого тактичного, уравновешенного, увлеченного работой человека и интересного собеседника.

Результаты исследований, выполненных под руководством и при участии В.М. Сугробова, отражены в многочисленных статьях, монографиях, отчетах, сборниках <http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/tks.htm>.

### Список литературы

1. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки : сб. статей / ИВ ДВНЦ АН СССР ; ред. В. М. Сугробов. Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1976. 284 с.
2. К 75-летию Виктора Михайловича Сугробова // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2(10). С. 193–194.
3. Памяти члена редколлегии журнала «Вулканология и сейсмология» Виктора Михайловича Сугробова // Вулканология и сейсмология. 2021. - № 2. С. 80.
4. Сугробов В.М. Паужетка. Первые шаги вулканологов в освоении тепловой энергии Земли // Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН. 1962–2012. Петропавловск-Камчатский, 2012. С. 191–198.
5. Сугробов В.М. 50 лет со дня пуска Паужетской геотермальной электрической станции / В.М. Сугробов, Г.А. Карнов, С.Н. Рычагов // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2016 г. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 443–448.

## Геохимия ультракислых термальных вод вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские острова)

Е.Г. Калачева

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
keg@kscnet.ru*

По результатам экспедиционных работ, проведенных в июле 2021 г. в центральной части о. Итуруп, представлена детальная геохимическая характеристика ультракислых термальных вод, разгружающихся на южном склоне вулкана Баранского. Показано, что источники «Голубые озера» относятся к редкому типу кипящих ультракислых сульфатно-хлоридных вод, в формировании которых, помимо смешения вулканического газа и приповерхностных подземных вод в постройке вулкана, участвуют хлоридно-натриевые воды геотермального резервуара другой гидротермальной системы, связанной с вулканом Баранского. Влияние хлоридных натриевых вод отражается преимущественно на катионном составе ультракислых источников долины руч. Кипящий.

**Ключевые слова:** ультракислые термальные воды, вулкан, химический состав, микроэлементы

## Geochemistry of Ultra-acid Thermal Water of the Baransky Volcano (Iturup Island, Kuril Islands)

Elena Kalacheva

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

According to the results of expeditionary work carried out in July 2021 in the central part of the Iturup Island, a detailed geochemical characteristic of ultra-acid thermal waters discharged on the south slope of Baransky volcano is presented. It is shown that the Blue Lakes springs belong to a rare type of boiling ultra-acid sulfate-chloride waters, in the formation of which, in addition to mixing volcanic gas and near-surface groundwater in the construction of the volcano, sodium chloride waters of a geothermal reservoir of another hydrothermal system associated with Baransky volcano. The effect of sodium chloride waters is mainly reflected in the cationic composition of ultra-acid springs in the valley of the Boiling River.

**Keywords:** ultra-acid thermal waters, volcano, chemical composition, trace elements

### Введение

Одним из наиболее специфических типов термальных вод, встречающихся в областях активного вулканизма, являются ультракислые ( $\text{pH} < 3$ )  $\text{SO}_4\text{-Cl}$  ( $\text{Cl-SO}_4$ ) вулканические воды (далее ASC (Acid Sulfate-Chloride), разгружающиеся вблизи от эруптивных центров, где сосредоточена разгрузка магматических летучих компонентов на поверхности (кратера, экструзивные купола и др.). Основной механизм формирования ASC-вод сводится к конденсации вулканических паров в близповерхностных условиях и/или растворении «кислых» магматических летучих ( $\text{SO}_4$ , Cl, HF) в азрированных подземных водах с образованием смеси кислот. Большинство ASC-вод обнаруженных и описанных в Японии и на Курильских островах, также встречаются в Индонезии и Латинской Америке.

В данном докладе дается характеристика макрокомпонентного и микроэлементного составов одного из наиболее редких типов ASC-вод, разгружающихся на южном склоне вулкана Баранского (о. Итуруп), затрагиваются вопросы особенностей их формирования.

### Общая характеристика вулкана Баранского и ультракислых источников

Действующий вулкан Баранского (Рис. 1), расположенный на Тихоокеанском побережье центральной части о. Итуруп, возник в позднем плейстоцене в кальдере Кипящая, одной из основных вулканотектонических структур хребта Грозный (Злобин, Знаменский, 1991). На

первом этапе развития характеризовался эксплозивно-эффузивной деятельностью, а позднеголоценовые извержения носили эксплозивный характер с образованием воронок взрыва разных размеров. Последнее зафиксированное извержение подобного типа произошло в 1951 г. (Рычагов и др., 1993). В настоящее время наблюдается сольфатарная деятельность в виде низкотемпературных (около 100 °С) парогазовых выходов, расположенных в юго-западном кратере и на вершине вулканического конуса. На его склонах расположено несколько термальных полей и отдельных групп источников различного химического состава.

Очаг разгрузки ASC-вод находится в долине руч. Кипящий (левый приток р. Серная) на южном склоне вулкана (Рис. 1, Табл. 1), представлен: а) кипящими источниками «Голубые озера»; б) горячим источником «Двуглавый»; в) теплыми источниками вдоль русла руч. Кипящий ниже основной разгрузки.

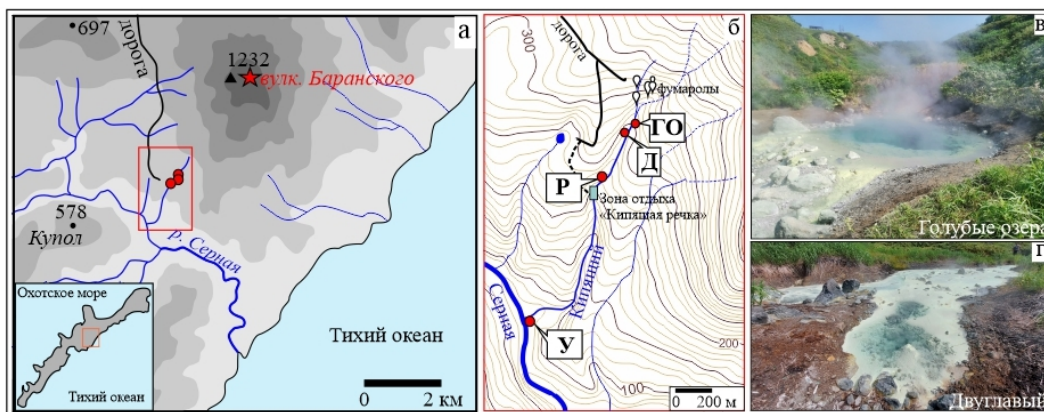


Рисунок 1 – Местоположение вулкана Баранского (а) и источников с точками отбора водных проб (б). Источники: «Голубые озера», основная воронка (в); «Двуглавый» (г)

## Результаты и их обсуждение

**Макрокомпоненты.** Физико-химические параметры и данные химического анализа термальных вод представлены в Таблице.

Таблица 1. Химический состав (мг/л) термальных вод вулкана Баранского

Шифр	Источники	T, °С	pH <sub>лаб</sub>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Al	Fe <sub>общ.</sub>	В	М, г/л
ГО	Голубые озера	96,1	1,23	31,4	1838	4654	112	44,6	147	38,2	417	165	47,3	8,43	7,50
Д	Двуглавый	64,7	2,95	0,31	170	500	116	29,5	36,6	11,7	215	0,29	<0,1	1,82	1,08
Р	Русловой	31,2	2,11	4,85	389	1015	99,9	26,7	47,5	14,7	191	76,6	15,06	2,14	1,88
У	Устьевой	32,3	1,58	12,0	703	1916	65,7	23,7	82,2	20,2	225	78,4	30,4	2,96	3,16

На диаграмме соотношения анионов источники «Голубые озера», «Русловой» и «Устьевой» попадают в зону «магматических вод» (затененная область), расположенную вблизи области составов вулканических газов, обозначенной буквой «М») (Рис. 2а).

Источник «Двуглавый» характеризуется низкой концентрацией фтор-ионов, но схожим с остальными источниками отношением SO<sub>4</sub>/Cl~1 (Рис. 2б). На треугольной диаграмме относительных концентраций (Рис. 2в) основных катионов точки составов источников «Голубые озера» ложатся вблизи составов вулканических пород (заштрихованная область), которыми сложен вулкан Баранского из (Рычагов и др. 1993). Отсутствие в водах источника «Двуглавый» алюминия и железа связано с относительно высоким значением рН. Концентрации этих элементов чувствительны к рН и воды с рН > 2,5 резко обедняются этими компонентами.

Распределение соотношений концентрации основных породообразующих элементов (Mg, Na, K, Ca, Fe, Al, Mn, Si, Ti) в источниках относительно средних их содержаний во вмещающих породах (Рис. 3а) и рассчитанные по магнию коэффициенты переноса элементов (ETR) (Рис. 3б) показывают существенное обогащение ультракислых вод (по сравнению с вмещающими породами) щелочными металлами (K и Na), тогда как концентрации Al, Fe, Ca, Mg, Mn и Si соответствуют полному растворению примерно 1 г породы в литре воды.

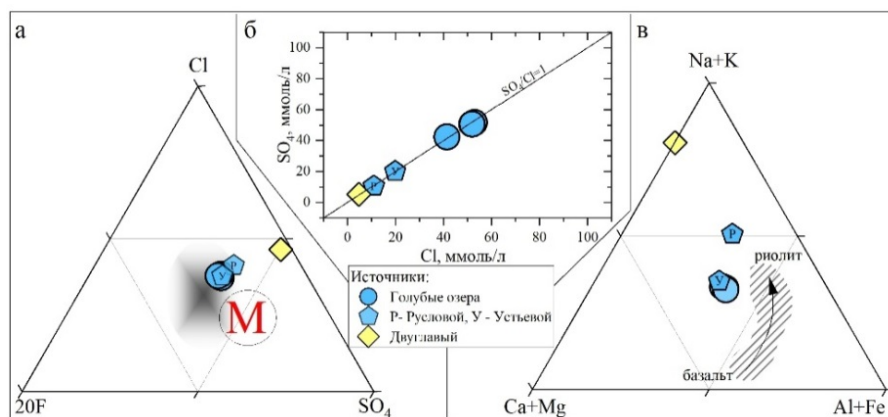


Рисунок 2 – Химический состав ASC-вод вулкана Баранского: а) Диаграмма анионного состава; б) Отношение SO<sub>4</sub>/Cl; в) Диаграмма катионного состава

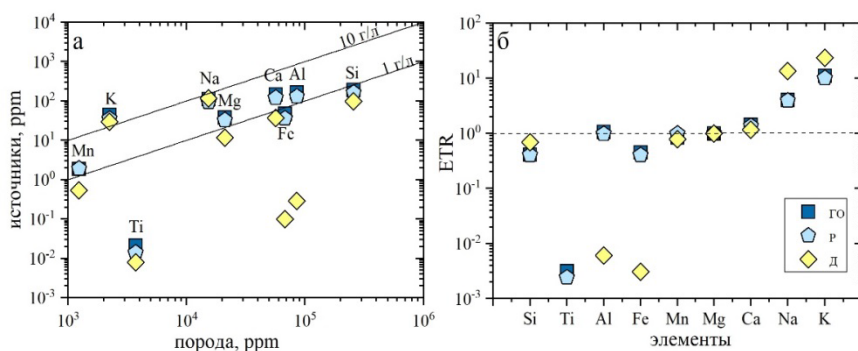


Рисунок 3 – Диаграмма отношений породообразующих элементов в координатах «концентрация в воде – концентрация в породе» в единицах ppm = мг/л = мг/кг (а). Коэффициенты переноса макроэлементов (ETR) в ASC-водах (б)

Следовательно, формирование химического состава исследуемых источников обусловлено не только изохимическим растворением, которое характерно для других ASC-вод Курильских островов, но и другими процессами. Обогащение щелочными металлами может происходить за счет смешения ASC-вод с водами Cl-Na-типа. Для источника «Двуглавый» наблюдаются более низкие концентрации алюминия и железа. Следует отметить высокие значения Si, также попадающие на линию растворения пород. Вероятнее всего это объясняется равновесием с аморфным кремнеземом, растворимость которого составляет около 400 мг/л при 100 °С.

**Микроэлементы.** Для изучения поведения микроэлементов в ультракислых источниках нами, как и для макрокомпонентов, использованы коэффициенты обогащения элементов между вмещающей породой (андезит, (Справочник по геохимии, 1990)) и раствором (Рис. 4а). Форма распределения элементов для «Голубых озер» и источника «Русловой» является типичной для ASC-вод Курильских островов. Выделяется протяженный горизонтальный участок со значениями близкими к линии полного растворения породы ( $F_i=1$ ), где располагаются точки данных по породообразующим, редким щелочным и щелочноземельным элементам. Заметно выше единицы ложатся точки для As, Se, В. Повышенные концентрации Se могут быть связаны с образованием сульфидных фаз и последующим их вторичным растворением в кислой воде. Источником высокоподвижных As и В, могут являться вулканические газы, формирующие анионный состав вод, а также (в случае бора) дополнительное поступление из вмещающих измененных пород. Повышенные концентрации Li и Cs могут быть за счет влияния глубинных хлоридно-натриевых вод. В источнике «Двуглавый», за исключением высокоподвижных элементов, наблюдаются более низкие коэффициенты распределения элементов, чем для источников «Голубые озера».

Профиль редкоземельных элементов (РЗЭ) для «Голубых озер» однородный с незначительным минимумом европия и легким обеднением тяжелыми РЗЭ, что в целом характерно для наиболее кислых вулканических вод. Распределение элементов в воде источника «Русловой» повторяет профиль основных источников, но при более низких концентрациях. В водах источника «Двуглавый» профиль РЗЭ значительно отличается от

графиков, характерных для остальной группы источников. Концентрации лантаноидов в этом источнике на порядок меньше, чем в других исследуемых термальных водах, и наблюдается значительное обеднение легкими элементами. В данном случае потеря и фракционирование РЗЭ может быть связана либо с осаждением сульфатных минералов, содержащих железо и алюминий при подъеме термальных вод к поверхности, либо при смешении ультракислых вод с водами другого типа.

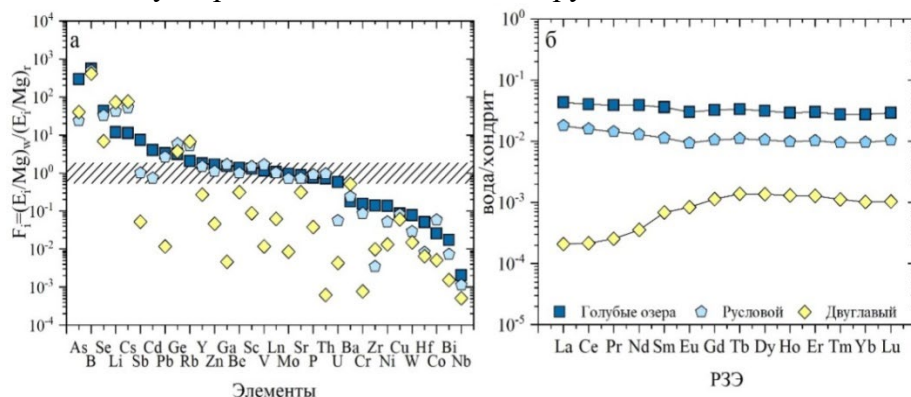


Рисунок 4 – Коэффициенты распределения элементов, нормированные по Mg (а) и профили редкоземельных элементов (б) для ASC-вод вулкана Баранского, нормированные на хондрит

### Заключение

Источники «Голубые озера» относятся к редкому типу ASC-вод, в формировании которых, помимо смешения вулканического газа и приповерхностных подземных вод в постройке вулкана, участвуют хлоридно-натриевые воды другой гидротермальной системы. Вероятно, вблизи выхода на поверхность по разломной зоне долины руч. Кипящий ультракислая вода адсорбирует перегретую пароводяную смесь, отделяющуюся от геотермального резервуара, приуроченного к юго-западному склону вулкана. Наличие пароводяной смеси Cl-Na состава с pH~7 на небольшой глубине в зоне развития ультракислых вод подтверждено бурением, гидротермальная система и сопряженное с ней геотермальное месторождение разведано и изучено (Рычагов и др., 1993). Влияние Cl-Na-вод отражается преимущественно на катионном составе ультракислых источников долины руч. Кипящий. Изучение макрокомпонентного состава последних выявило существенное их обогащение щелочными металлами (K и Na), тогда как концентрации Al, Fe, Ca, Mg, Mn и Si соответствуют полному растворению примерно 1 г породы в литре воды. В микроэлементном составе источников «Голубые озера» выявлено типичное для наиболее кислых сульфатно-хлоридных вод Курильской дуги распределение РЗЭ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 20–17–00016.*

### Список литературы

1. Справочник по геохимии / Г. В. Войткевич, А. В. Кокин, А. Е. Мирошников, В. Г. Прохоров . М.: Недра, 1990. 480 с.
2. Злобин Т.К. Геология и глубинное строение геотермального района, о. Итуруп / Т. К. Злобин, В. С. Знаменский // Геология рудных месторождений. 1991. № 4. С. 3–15.
3. Рычагов С.Н. Температурная и геолого-геохимическая модель геотермального месторождения Океанское (о. Итуруп) / С. Н. Рычагов, С. Ф. Главатских, О. П. Гончаренко и др. // Геология рудных месторождений. 1993. № 5. С. 405–418.



## **Рудоносный метасоматоз в вулканогенных формациях Дальнего Востока России – от докембрия до наших дней**

**В.Е. Кириллов<sup>1</sup>, А.С. Лапенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт тектоники и геофизики ИТиг ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия  
kirillov@itig.as.khb.ru*

<sup>2</sup>*Магаданский филиал АО «Полиметалл», г. Магадан, Россия*

В статье рассматриваются особенности проявления рудоносного метасоматоза в вулканогенных формациях, проявившегося от докембрия до настоящего времени в ряд этапов. Показано, что раннепротерозойскому этапу свойственен щелочной метасоматоз, позднепротерозойскому – щелочной и кислотный. Для фанерозойского времени характерен кислотный метасоматоз с глиноземистыми и кремнеземистыми рудоносными гидротермальными формациями.

**Ключевые слова:** вулканогенные формации, рудные формации, рудоносные метасоматиты, металлогенические этапы

## **Ore-bearing Metasomatism in Volcanogenic Formations of the Russian Far East – from the Precambrian to the Present Day**

**Vadim Kirillov<sup>1</sup>, Alexander Lapenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Tectonics and Geophysics, ITiG FEB RAS, Khabarovsk, Russia*

<sup>2</sup>*Magadan branch of JSC «Polymetal», Magadan, Russia*

The article discusses the features of ore-bearing metasomatism in volcanogenic formations, which manifested itself from the Precambrian to the present in a number of stages. It is shown that the Early Proterozoic stage is characterized by alkaline metasomatism, while the Late Proterozoic is characterized by alkaline and acid metasomatism. The Phanerozoic time is characterized by acid metasomatism with aluminous and siliceous ore-bearing hydrothermal formations.

**Keywords:** volcanogenic formations, ore formations, ore-bearing metasomatites, metallogenic stages

Рудоносный метасоматоз в вулканогенных формациях Дальнего Востока проявился в ряд металлогенических этапов в докембрийское, палеозойское, мезозойское и кайнозойское время (Рис. 1, таблица 1).

К наиболее ранним (около 1700 млн. лет) относятся рибекит-альбитовые метасоматиты фенитового типа и альбититы с редкоземельной минерализацией. Объемная постмагматическая рибекит-альбитовая фенитизация характерна для вулканитов кислого состава, слагающих Бириндинскую вулканоструктуру в пределах Улканского плутона PR<sub>1</sub> возраста в восточной части Алданского щита. Альбитизация сопровождала фенитизацию и проявилась в разломных зонах с появлением тел кварц-альбит-рибекитового состава. Содержания TR в альбититах достигают рудных концентраций. Температура образования щелочных метасоматитов оценена в 300–550° (Недашковский и др., 2000).

Оруденение PR<sub>2</sub> возраста не связано непосредственно с вулканическими процессами и проявилось в разломных зонах в результате тектонической активизации и сопровождающего гидротермального метасоматоза (Горошко и др., 2006). Рудоносные березиты, аргиллизиты и эйситы проявились в Улканском вулканогенном прогибе и в метаморфических породах его фундамента. С кварц-гематит-гидрослюдистыми аргиллизитами связаны месторождения Nb, Mo, U, F и Be в западной части прогиба (Элгэтэ, Красная Горка). Зоны гидрослюдистых березитов с U, Mo и Ag оруденением (Топорикан) в западном борту прогиба контролируются крутопадающими разломами и зоной структурно-стратиграфического несогласия AR-PR<sub>1</sub>. Березитизация сопровождалась углеродистым метасоматозом, U и сульфидной

минерализацией. В фундаменте вулканитов в зонах гидрослюдистой березитизации с кварц-адуляровыми прожилками распространена Au минерализация (месторождение Широтное). Температуры образования аргиллизитов оценены в 50–290°, березитов 125–260°. Альбит-апатитовая эйситизация контролировалась разломными зонами, сопровождалась U и TR (Ce, Y) минерализацией (Недашковский и др., 2000).

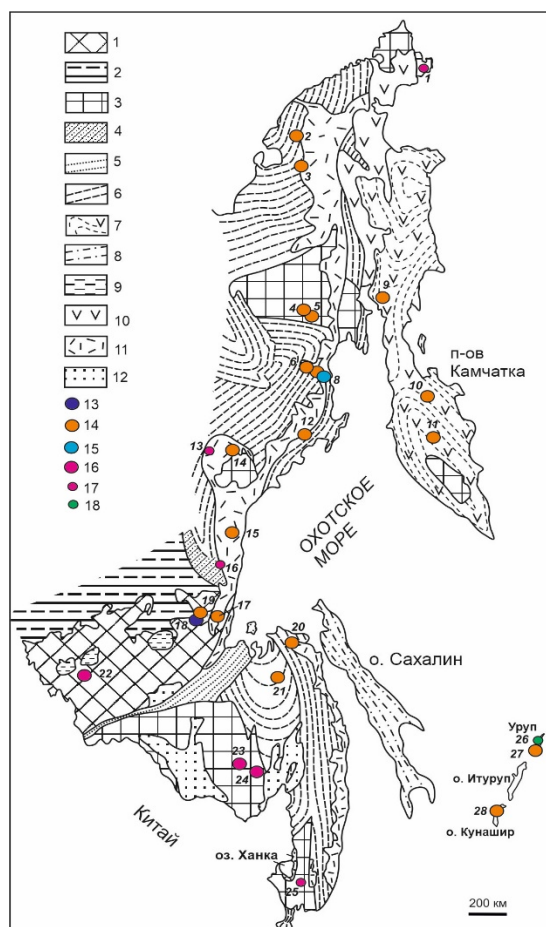


Рисунок 1 – Месторождения и рудопроявления в вулканогенных формациях Дальнего Востока

- 1 – Алдано-Становой щит;
- 2 – Алданская плита Сибирской платформы;
- 3 – докембрийские массивы;
- 4 – перикратонные прогибы;
- 5 – Монголо-Охотский складчатый пояс;
- 6 – мезозойские складчатые пояса;
- 7 – мезозойско-кайнозойские складчатые пояса с вулканогенными формациями;
- 8 – кайнозойские складчатые пояса;
- 9 – юрские угленосные впадины;

- 10–11 – окраинно-континентальные вулканические пояса:
- 10 – мезозойско-кайнозойские;
- 11 – мезозойские;
- 12 – наложенные кайнозойские впадины;
- 13–17 – месторождения и рудопроявления рудных формаций:
- 13 – редкоземельных,
- 14 – золото-серебряной,
- 15 – серебро-полиметаллической,
- 16–17 – уран-молибденовой:
- 16 – месторождения,
- 17 – рудопроявления;
- 18 – медно-полиметаллической.

Наиболее значительные месторождения и рудопроявления:

- |                  |                    |  |
|------------------|--------------------|--|
| 1 – Киф,         | 10 – Озерновское,  | 20 – Многовершинное, 21 – Албазинское, |
| 2 – Майское,     | 11 – Агинское,     | 22 – Сутамское,                        |
| 3 – Купол,       | 12 – Карамкен,     | 23 – Каменушинское,                    |
| 4 – Биркачан,    | 13 – Радужное,     | 24 – Скальное,                         |
| 5 – Кубака,      | 14 – Хаканжинское, | 25 – Блуждающее,                       |
| 6 – Лунное,      | 15 – Светлое,      | 26 – Отливное,                         |
| 7 – Дукат,       | 16 – Ядра,         | 27 – Купол (Уруп),                     |
| 8 – Гольцовое,   | 17 – Авляякан,     | 28 – Прасоловское                      |
| 9 – Аметистовое, | 18 – Бириндя,      |  |
|                  | 19 – Широтное,     |  |

В девонское и каменноугольное время рудогенные поствулканические процессы проявились в вулканоструктурах Охотского, Ханкайского и Омолонского кратонных террейнов. Их общей особенностью является развитие, на фоне аргиллизации и пропилитизации, гидрослюдистой березитизации, кварц-адуляр-гидрослюдистых метасоматитов и вторичных кварцитов с Au, Ag, Se, Te (Омолонский массив) или U, Mo оруденением (Охотский и Ханкайского массивы). Температуры образования рудоносных метасоматитов оценены в 100–306° (Волков и др., 2016).

В меловое время метасоматоз интенсивно проявился в вулканических поясах и зонах ареального вулканизма в верхнем структурном этаже (вулканиты) и в нижнем (терригенные складчатые и метаморфические комплексы) (Моисеенко и др., 1996). Рудоносные метасоматиты относятся к березитам и аргиллизитам с Au, Ag и полиметаллической специализацией (Таб. 1). Рудные месторождения U с Mo, F этого возраста в березитах приурочены к вулканоструктурам на метаморфическом основании (Горошко и др., 2006).

В кайнозое рудообразование проявилось в континентальных вулканических поясах, а также на Камчатке и Курильских островах. Золотое, с Ag, Te оруденение связано с кварцевыми жилами во вторичных кварцитах, а также с каолинит-диккитовыми аргиллизитами, березитами серицит-гидрослюдисто-кварцевого, гидрослюдисто-хлорит-кварцевого состава. Современное рудообразование вблизи выходов термальных источников отмечается на Камчатке и Курильских островах. Его особенностями являются локализация вблизи вулканоструктур и связь с вторичными кварцитами и сульфидно-кварцевыми метасоматитами с Au, Ag, Cu, Hg, Re и Bi геохимической специализацией.

Температура образования рудогенных систем MZ и KZ возраста варьировала в пределах 200–150° (Сидоров и др., 2016). Наиболее продуктивным типом изменений являлись березиты гидрослюдистой фации со штокверками и жилами гидротермалитов.

Таблица 1. Рудоносные метасоматические и рудные формации в вулканитах

Этаж	Метасоматическая формация	Рудная формация, основные минеральные ассоциации	Месторождения, рудопроявления
<i>Современный период</i>			
Нижний структурный этаж	Вторичные кварциты	Медно-полиметаллическая формация. Сфалерит-реальгар-халькопиритовая ассоциация	Отливное (Cu, Zn, As, Ag, Au)
<i>Кайнозойская эра. Альпийский металлогенический этап. 60–20; 6–2 млн. лет</i>			
Верхний и нижний структурные этажи	Вторичные кварциты, кварц-серицит-адуляровые жилы	Золото-серебряная формация. Золото-теллуридно-кварцевая, золото-полисульфидно-кварцевая ассоциации	Прасоловское, Купол (Уруп) (Au, Ag, Te, Cu, Sb)
	Кварц-адуляровые жилы	Золото-серебряная формация. Сульфидно-теллуридно-золотая ассоциация	Многовершинное (Au, Ag, Te, Zn, Pb)
Верхний вулканогенный структурный этаж	Аргиллизиты, вторичные кварциты, сульфидно-кварцевые жилы	Золото-серебряная формация. Золото-голдфилдитовая, золото-гесситовая, золото-сульфидно-кварцевая ассоциации	Озерновское, Аметистовое (Au, Ag, Se, Te, Cu, Sb, As)
	Березиты гидрослюдистые, адуляр-кварцевые жилы	Золото-серебряная формация. Золото-теллуридно-кварцевая ассоциация	Агинское (Au, Ag, Te, Cu)
	Гидрослюдистые березиты	Уран-молибденовая формация. Настуран-флюорит-сульфидная ассоциация	Киф, Чаплино (U, Mo, Pb, F)
<i>Мезозойская эра. Киммерийский и Альпийский металлогенические этапы. 130–74 млн. лет</i>			
Верхний вулканогенный структурный этаж	Серицит-гидрослюдистые березиты с хлоритом. Кварц-адуляровые и кварц-адуляр-кальцитовые жилы	Золото-серебряная формация. Золото-сульфидная, серебро-науманнит-полибазитовая, серебро-кварц-родонитовая, кварц-акантитовая, кварц-аргентитовая ассоциации	Карамкенское, Хаканжинское, Авляякан, Дукат, Лунное (Au, Ag, Se, Cu, Zn, Pb, Mn)
		Золото-серебряная формация. Арсенопирит-пирит-адуляр-кварцевая, золото-стефанит-пираргирит-адуляр-кварцевая ассоциации	Купол (Au, Ag, As, Sb)
Нижний структурный этаж	Гидрослюдистые березиты	Золото-сульфидно-кварцевая формация. Золото-арсенопирит-кварцевая ассоциация	Албазинское (Au, Ag, As, Sb)
	Лиственит-березитовая формация	Золото-кварцевая формация. Золото-арсенопирит-кварцевая, золото-тетраэдрит-халькопиритовая ассоциации	Майское (Au, Ag, As, Sb)
Верхний вулканогенный структурный этаж	Гидрослюдистые березиты, аргиллизиты	Уран-молибденовая формация. Настуран-сульфидная, настуран-иордизитовая ассоциации	Радужное, Киф, Каменушинское, Скальное (U, Mo)
	Гидрослюдистые березиты	Серебро-полиметаллическая формация. Кварц-галенитовая, фрейбергит-галенит-сфалеритовая ассоциации	Гольцовое
<i>Палеозойский период. Герцинский металлогенический этап. 390–320 млн. лет</i>			
Верхний вулканогенный структурный этаж	Гидрослюдистые березиты, вторичные кварциты	Золото-серебряная формация. Кварц-электрум-пирсеитовая, золото-электрум-гесситовая, золото-кварц-адуляровая ассоциации	Кубака, Биркачан, Бургали (Au, Ag, Se, Te)
	Гидрослюдистые березиты	Галенит-браннерит-настурановая, уранинит-браннеритовая	Искра, Осевое (U, Mo, Pb, Sb, As)
<i>Позднепротерозойский (гренвилльский) металлогенический этап. 1263–1053 млн. лет</i>			
Верхний и нижний структурные этажи	Гидрослюдистые березиты	Уран-молибденовая формация. Битум-настуран-молибденитовая ассоциация	Топорикан (U, Mo, Ag)
		Золото-кварцевая формация. Золото-кварц-адуляровая ассоциация	Широтное (Au, Ag, Mo)

Этаж	Метасоматическая формация	Рудная формация, основные минеральные ассоциации	Месторождения, рудопроявления
Верхний и нижний структурные этажи	Аргиллизитовая	Уран-молибденовая формация. Настуран-ферримолибдитовая ассоциация. Редкометалльная формация. Гематит-эксенитовая ассоциация.	Элгэтэ (U, Mo), Красная Горка (Ta, Nb)
	Эйситовая	Редкоземельно-редкометалльная формация. Фторапатит-синхизит-ксенотимовая ассоциация	Тангукта (U, Y, Ce, Ag)
<i>Раннепротерозойский металлогенический этап. 1700 млн. лет</i>			
Верхний вулканогенный структурный этаж	Фенитовая	Редкоземельно-редкометалльная формация. Альбит-рибекит-гентгельвин-паризитовая	Командное (Zr, Ce, La, Y)
	Альбититовая	Редкоземельно-редкометалльная формация. Пирохлор-монацит-бастнезитовая	Бириндя (Ce, La, Nb, Ta)

### Заключение

В раннем протерозое редкоземельно-редкометалльное рудообразование в вулканических формациях связано с высокотемпературным щелочным метасоматозом, проявившимся в связи с внедрением интрузий повышенной щелочности. Для позднего протерозоя характерен мезо-эпитермальным кислотный и щелочной метасоматоз с U-TR специализацией, при отсутствии видимой связи с магматическими формациями. Фанерозойское время отличается преимущественно эпитермальным кислотным метасоматозом (метасоматиты формаций аргиллизитов, вторичных кварцитов, березитов) с U, Mo, Au-Ag и халькофильной специализацией. Оруденение связано с локальными вулканоструктурами и поствулканическими процессами. Руды, особенно распространенной золото-серебряной формации, характеризуются значительным минеральным разнообразием.

### Список литературы

1. Волков А.В. Особенности эпитермального рудообразования в Кедонском палеозойском вулканоплутоническом поясе Северо-Востока России, по данным геохимических исследований Au-Ag оруденения / А.В. Волков, А.А. Сидоров, Н.Е. Савва, В.Ю. Прокофьев // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 3–21.
2. Горошко М.В. Металлогения урана Дальнего Востока России / М.В. Горошко, Ю.Ф. Мальшев, В.Е. Кириллов. М.: Наука, 2006. 372 с.
3. Моисеенко В.Г. Золоторудные месторождения Востока России / В.Г. Моисеенко, Л.В. Эйриш. Владивосток: Дальнаука, 1996. 352 с.
4. Геологическое строение и металлогения Улканского вулканогенного прогиба (юго-восток Алданского щита) / П.Г. Недашковский, В.Е. Кириллов, В.А. Гурьянов, В.А. Пахомова. Владивосток: Дальнаука, 2000. 68 с.
5. Сидоров А.А. Вулканизм и эпитермальные месторождения / А.А. Сидоров, А.В. Волков, Н.Е. Савва // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 3–12.

## **Моделирование условий термогидродинамического взаимодействия между Паратунским и Верхне-Паратунским месторождениями**

Н.Б. Журавлев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
zhuravlev-95@mail.ru*

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью определения областей водного питания Верхне-Паратунского и западного сектора Паратунского месторождения. Предлагается концептуальная модель, предусматривающая единый источник водного питания двух вышеупомянутых месторождений и их возможную гидравлическую взаимосвязь. Проведено TOUGH2 моделирование, результаты которого показали физическую корректность данной концептуальной модели. Результаты моделирования могут послужить основой для дальнейших исследований по изучению влияния добычной эксплуатации на производительность месторождений.

**Ключевые слова:** Верхне-Паратунское геотермальное месторождение, кальдера Леонова, водное питание, TOUGH2, область водного питания

## **TOUGH2- modeling of thermal-hydrodynamic interaction conditions between the Paratunsky and Upper-Paratunsky fields**

Nikita Zhuravlev

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia  
Saint Petersburg State University, St Petersburg, Russia*

This research is motivated by the problem of locating the water supply areas of the Paratunsky geothermal field. The article proposes a conceptual model of meteoric infiltration feeding of the western flank of the field from the high-elevated areas. To check the correctness of this hypothesis, the thermal hydrodynamic model of water supply was assembled using the TOUGH2 software package. Modeling results showed the fundamental possibility of infiltration feeding through the structure of Leonov Caldera, water heating by heat mining from host rocks at the depths down to –5000 masl and its discharge into the high-permeable zones of the geothermal field. The findings of the research may serve as a basis of further studies for investigation of the exploitation influence on the fields performance.

**Keywords:** Upper-Paratunsky geothermal field, Leonov caldera, water supply area, TOUGH2

### **Введение**

Паратунские геотермальные месторождения уже долгие годы являются источниками геотермального теплоснабжения тепличных хозяйств пп. Паратунка и Термальный, сети бассейнов и бальнеологических учреждений в курортно-санаторной зоне р. Паратунка.

Несмотря на то, что геолого-гидрогеологические особенности Паратунской гидротермальной системы достаточно хорошо изучены, всё ещё нерассмотренной остаётся гидравлическая взаимосвязь при совместной эксплуатации Паратунского и Верхне-Паратунского месторождений. Дискуссионным является вопрос об их источниках водного и теплового питания. Так, целью настоящей работы является проверка гипотезы о единых условиях формирования, водного и теплового питания Паратунских продуктивных резервуаров.

### **Концептуальная модель водного и теплового питания**

Водное питание Паратунского месторождения формируется за счёт инфильтрационных вод обширной площади геотермального района и смежных с ним территорий. Исходя из результатов анализов изотопного состава воды (Кирюхин, 2020), области с абсолютными отметками выше 1000 м, где фиксируется распространение ледников

и многолетних снежников (Вилучинский вулкан, локальные приводораздельные области кальдеры Леонова в верховьях р. Карымшина), являются наиболее вероятными областями водного питания Паратунских геотермальных месторождений (Kiryukhin et al, 2017, Кирюхин, 2020).

Формирующийся Центральный рифт в зоне раздвига представлен на Паратунском месторождении глубоко проникающим центральным разломом, разделившим Паратунское месторождение на 2 половины - западную и восточную, имеющими разнонаправленные зоны смесителя (Серезников и др., 2000, Ворожейкина, 2019).

Условия водного питания восточного фланга Паратунского месторождения от структуры Вилучинского вулкана рассмотрены в работе (Журавлев, 2019). В настоящем исследовании рассматриваются условия водного и теплового питания Верхне-Паратунского и западного фланга Паратунского месторождений (участки Средний, Микижа, Светлячок). Так, структуры северо-восточного сектора кальдеры Леонова и в верхнем течении р. Карымшина являются наиболее вероятными их областями водного питания (рис. 1).

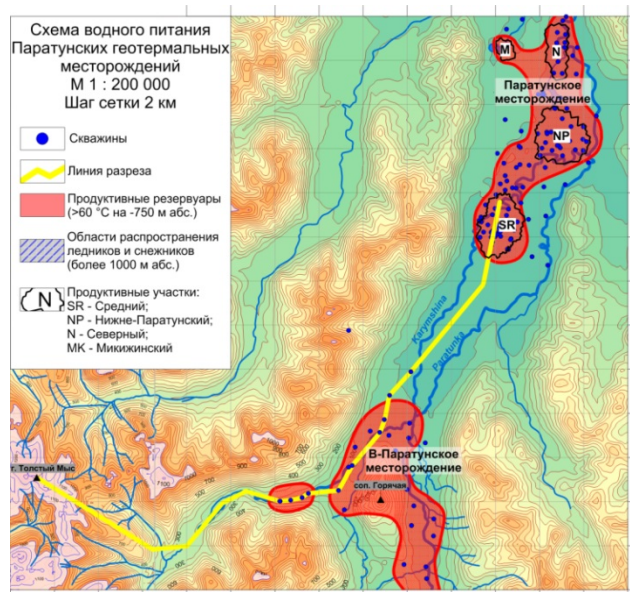


Рисунок 1 – Схема водного питания Паратунского геотермального района

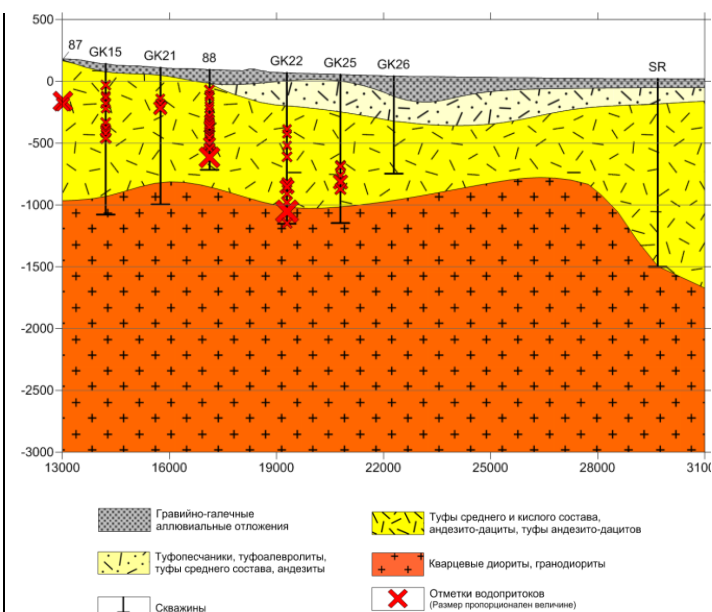


Рисунок 2 – Гидрогеологический разрез Верхне-Паратунского месторождения по данным разведочного бурения

По данным разведочного бурения построены схематичный гидрогеологический разрез (Рис. 2). Определено наличие горизонта холодных грунтовых вод мощностью до 100 м, низкопроницаемого термоводоупорного слоя мощностью до 250 м, продуктивного резервуара мощностью 500–800 м и кристаллического фундамента ниже отметок –1000 м абс.

Для анализа распределения проницаемости вмещающих пород Паратунской депрессии были привлечены фондовые материалы геофизических исследований, проведённых Паратунской тематической гидрогеологической партией в 1989–1994 гг. (Шварц и др., 1995). Результаты исследований на Паратунской геотермальной площади показали, что магнитотеллурическое зондирование является наиболее эффективным инструментом выявления областей растёка термальных вод в высокопроницаемых средах. Другие методы геофизических исследований показали себя менее эффективно из-за избыточного влияния приповерхностных или региональных аномалий.

Так, по данным геофизических зондирований, под сопкой Горячей выявлен интенсивный минимум удельного электрического сопротивления (до 10000 Ом·м) и выделен интенсивный гравитационный (более 10 мГал) минимум, который может отображать глубинный источник тепла (Шварц и др., 1995). Данные магнитотеллурического зондирования также выявили аномалию повышенной проводимости ЮЮВ простирания от Среднего участка к В-Паратунскому месторождению на глубинах 400–2000 м (Шварц и

др., 1995), которая интерпретирована как область повышенной проницаемости, соединяющая продуктивные резервуары двух месторождений в единый супербассейн термальных вод.

### Численное моделирование

Для описания теплопереноса в гидротермальных системах эффективным инструментом является программа моделирования потоков многофазных флюидов и потоков тепла в пористой и трещиноватой среде – TOUGH2. Для графической визуализации результатов математического моделирования совместно используется препроцессор PetraSim. При его помощи и исходя из вышеописанной концептуальной модели была собрана термогидродинамическая модель процесса водного питания геотермальных резервуаров.

Модель включает водосборные площади восточной окраины кальдеры Леонова и верхнего течения р. Карымшина, продуктивные резервуары Верхне-Паратунского и Паратунского месторождений по линии разреза от г. Толстый Мыс до Среднего участка (рис. 3). Размеры моделируемой области по осям X, Y, Z составляют 31000 м, 100 м и 4500 м соответственно.

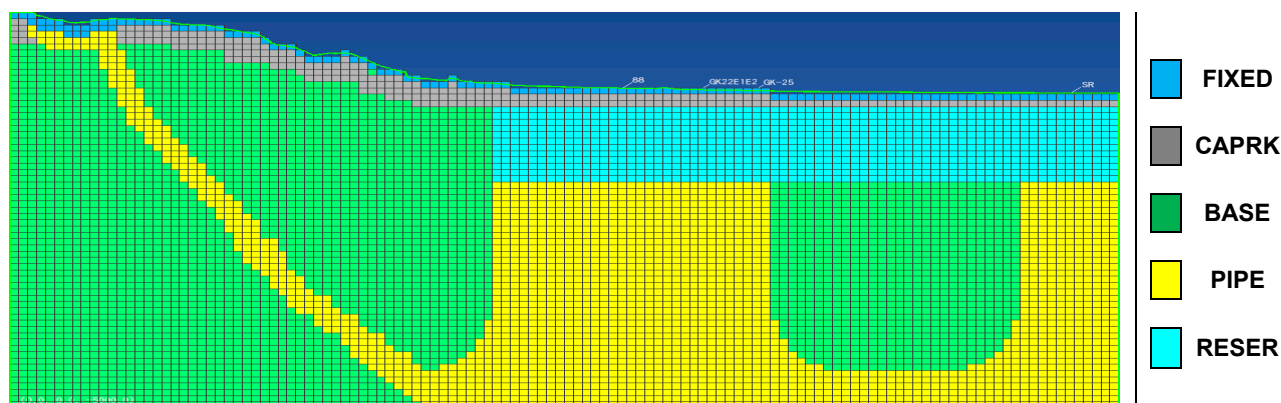


Рисунок 3 – Зонирование модели на домены с различными материальными свойствами.

Условные обозначения: PIPE – проницаемые структуры, по которым происходит водное питание;

FIXED – зона с фиксированным состоянием окружающей среды (температурой и давлением);

CAPRK – водоупор; BASE – вмещающие породы, низкопроницаемые;

RESER – проницаемый продуктивный резервуар Паратунского месторождения

На рис. 3 показано зонирование модели, где в каждой из зон задаются различные значения проницаемости, пористости, плотности, теплопроводности. Значения петрофизических свойств доменов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Материальные свойства доменов модели.

Характеристики	Домены			
	PIPE	BASE	RESER	CAPRK
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2600	2700	2300	2700
Пористость	0,1	0,1	0,1	0,2
Проницаемость, м <sup>2</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-16</sup>	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-17</sup>
Теплопроводность, Вт/м °С	2,1	1,4	2,1	2,1
Теплоемкость, Дж/кг °С	1000	1000	1000	1000
Сжимаемость, Па <sup>-1</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-8</sup>	4,1×10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-8</sup>

В верхней части домена PIPE задано поступление флюида (воды) 330 кг/с. Верхней границе модели присвоено фиксированное состояние, соответствующее усредненным атмосферным условиям (T=10 °С, P=1 бар). В нижних ячейках модели заданы значения теплового потока от 0,06 до 0,24 Вт/м<sup>2</sup>, где наибольшие значения заданы под сопкой Горячей.

Проведено моделирование естественного состояния, которого модель достигла за период 500 тыс. лет, что соответствует общепринятым оценкам возраста формирования Верхне-Паратунского месторождения (Непримеров и др., 1970, Николаев и др., 1980). На рис. 4 показаны результаты моделирования. Максимальные температуры наблюдаются в

продуктивном геотермальном резервуаре. Изолинии максимальной температуры вытянуты в направлении потоков теплоносителя в геотермальном резервуаре. Векторы показывают направление потоков термальных вод.

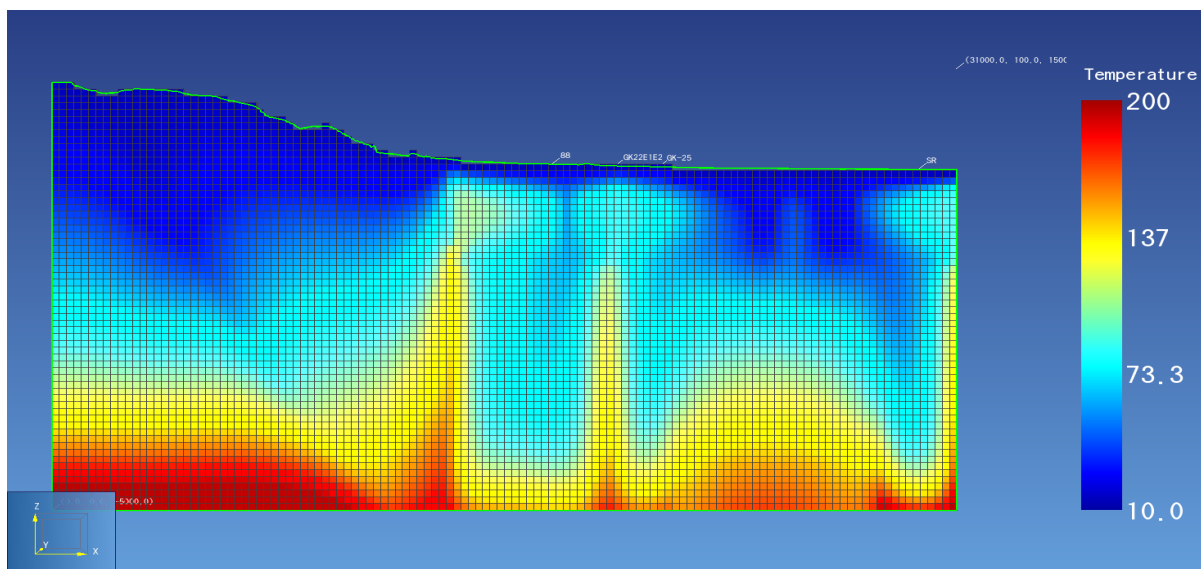


Рисунок 4 – Результаты TOUGH2 моделирования. Векторами на разрезе показаны направления потоков теплоносителя. Цветом показано распределение температуры

### Результаты

Таким образом, моделирование подтвердило физическую корректность предложенной концептуальной модели водного и теплового питания Паратунских месторождений. Показано, что метеорные воды поступают через высокопроницаемые зоны на глубины –3000 –5000 м, где они прогреваются за счёт съёма тепла вмещающих пород, кондуктивного теплового потока и локальных тепловых источников, и движутся к зонам разгрузки Верхне-Паратунского и Среднего участков.

Также предпринята попытка моделирования эксплуатации двух месторождений в условиях взаимодействия, но полученные модельные результаты пока что не показали существенных изменений температуры и давления в продуктивных резервуарах.

Наиболее вероятными способами решения этой задачи являются:

- (1) получение более полного набора данных о расходах водоотбора на В-Паратунском месторождении с 1964 г. и проведение моделирования за более широкий временной период;
- (2) уточнение материально-ёмкостных свойств термоводовмещающих пород Паратунской депрессии в рассматриваемой области между двумя месторождениями.

*Работа выполнена по проекту № 0282-2018-0017.*

### Список литературы

1. Серёжников А.И. Отчёт о результатах гидрогеологического доизучения с инженерно-геологическими, экологическими исследованиями и картографированием м-ба 1:200 000 на территории листа N-57- XXVII в 1991–1996 гг. / А.И. Серёжников, В.А. Лазарев и др. Елизово, 2000.
2. Ворожейкина Л.А. Паратунская впадина – супербассейн термальных вод// Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2019), 3-8 сентября 2020 г. / Л.А. Ворожейкина. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 120–131.
3. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. / А. В. Кирюхин. Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.



4. *Журавлев Н.Б.* TOUGH2-моделирование условий водного питания Паратунского геотермального месторождения // *Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2019)*, 3-8 сентября 2020 г. / *Н.Б. Журавлев*. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 120–131.

5. *Шварц Я.Б.* Опытнo-методическая работа по применению геологоструктурных, гидрогеологических, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях. / *Я.Б. Шварц, А.Г. Нурмухамедов, А.С. Желтухин*. Термальный: Авачинская тематическая гидрогеологическая партия, 1995. Т. 2.

6. *Непримеров Н.Н.* Научно-исследовательская работа по теме: Гидродинамические и термические исследования Паратунского месторождения термальных вод / *Н.Н. Непримеров, А.В. Штанин*. Казанский университет, 1970.

7. *Николаев С.А.* Отчёт № 9 о научно-исследовательской работе по теме: «Гидродинамические и технические исследования Паратунского месторождения термальных вод». Казань, КГУ. 1980.

8. *Kiryukhin A. V.* Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia. / *A. V. Kiryukhin, L. A. Vorozheikina, P. O. Voronin, P. A. Kiryukhin* // *Geothermics*. 2017. Vol. 70. P. 47–61.

## РАЗДЕЛ III. СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ, ВУЛКАНИЧЕСКИХ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ, АКТИВНЫЕ И ПРОДУКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ

### CHAPTER III. SEISMICITY IN GEOFLUID, VOLCANIC AND HYDROTHERMAL SYSTEMS, ACTIVE AND PRODUCTIVE FAULTS

УДК 550.341.5

#### Магматическая активность Мутновского вулкана и перспективы расширения Мутновского геотермального месторождения

А.Ю. Поляков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
pol@kscnet.ru*

Измерения парциального давления на конденсаторе пара Мутновской ГеоЭС используются в качестве индикатора разгрузки магматических газов через систему магмофраккинга вулканической системы в продуктивный геотермальный резервуар. Магмофраккинг под вулканом Мутновский связан с гидротермальными взрывами и оползнями (2009–2021 гг.). Обнаруженные распределения магмофраккинга дают возможность предполагать наличие нового продуктивного геотермального резервуара под северо-восточными областями Мутновского вулкана (глубиной от –4000 до –2000 м и площадью 30 км<sup>2</sup>).

**Ключевые слова:** магма, инъекции, MEQ, Мутновский, продуктивный, НКГ, гидромеханический, модель

#### Magmatic activity of the Mutnovsky volcano and prospects for the expansion of the Mutnovsky geothermal field

Andrey Polyakov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Mutnovsky GeoPP steam collection system shows sensitivity to non-condensable gases (NCG) content (partial gas pressure) variations (2019–2020), that is used as indicator of magmatic gasses recharge via magma fracking volcano system to production geothermal reservoir. Magma fracking beneath Mutnovsky volcano is associated with small and medium hydrothermal explosions and landslides (2009–2021). Magma fracking distributions indicate the presence of a new productive geothermal reservoir beneath northeast foothills of Mutnovsky volcano (depth range from –4000 to –2000 m, accessible area of 30 km<sup>2</sup>).

**Keywords:** magma injections, MEQ, Mutnovsky, production, NCG, hydromechanical, model

#### Введение

Масштабная эксплуатация Мутновского геотермального месторождения с 2002 г. при отборе флюидов до 500 кг/с (600 МВтч) сравнима со средней энергоемкостью магмы двух близлежащих действующих вулканов Мутновский и Горелый (перенос тепловой энергии в магме за время существования вулканов). Повышение фреатомагматической активности Мутновского вулкана с 2000 г. может быть связано с эксплуатацией геотермальных месторождений. После 40 лет покоя в кратере Мутновского вулкана в марте 2000 г., апреле 2007 г., мае 2012 г., июле 2013 г., феврале 2018 г. и весной 2020 г. произошли гидротермальные взрывы и выбросы пепла и мощное парогазовое извержение из кратера вулкана Горелый, массовый расход которого оценивается в 130 кг/с (H<sub>2</sub>O ~ 93%, НКГ ~ 7%), исчезли кратерные озера вулканов Мутновский и Горелый (в 2004 и 2012 гг.). Сейсмическая активность с февраля 2009 г. по октябрь 2020 г. также увеличилась; зарегистрировано

568 землетрясений с магнитудой  $M_L$  выше 1,0 ( $M_L = K_s \times 0,5 - 0,75$ ). Изменяющаяся во времени трехмерная картина магмофраккинга сопоставляется с фреатомагматической активностью вулкана Мутновский и поступлением магматических газов в продуктивные геотермальные резервуары. Полученная информация используется для выявления потенциальных продуктивных геотермальных резервуаров в северо-восточном секторе Мутновского вулкана с целью возможности увеличения электрической мощности Мутновских ГеоЭС.

### Измерения притока магматического газа в продуктивный резервуар Мутновской ГеоЭС ( $P_{CO_2}$ )

Магматические газы рассматриваются как составная часть даек, инжектированных из магматической системы Мутновского вулкана в продуктивные геотермальные резервуары.

Мутновская ГеоЭС имеет две турбины по 25 МВт каждая и два сепаратора, которые питают турбины паром. К сепаратору-1 подключены скважины 24, А2, Гео-3, О29В, О16, ГК1, к сепаратору-2 подключены скважины О42, О13, О17, О37, Гео-2, расположение скважин показано на Рис. 1. Таким образом, измеряя газосодержание в общем паре, мы можем отслеживать дополнительные притоки магматического газа, синхронизированные с

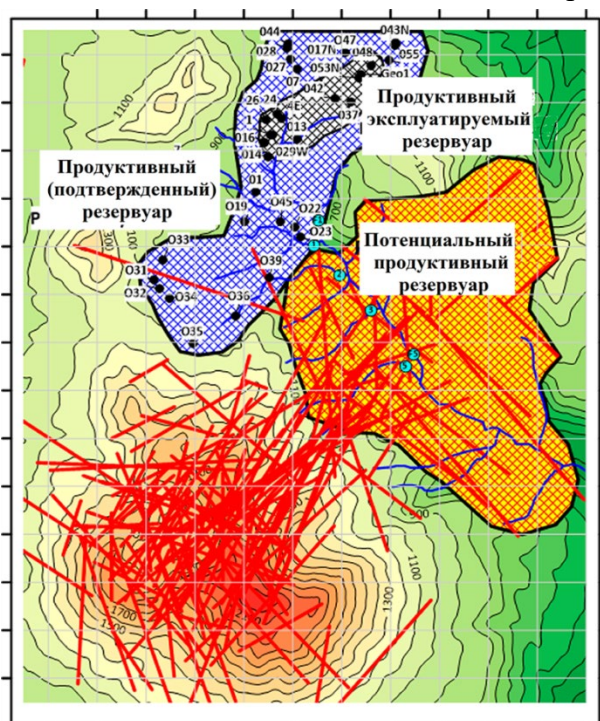


Рисунок 1 – Потенциальный эксплуатационный геотермальный резервуар за пределами существующего участка. Следы даек на отметках –3000 и –1500 м показаны красными линиями, масштаб по осям – 1 км

вышеупомянутыми инъекциями магмы. Наиболее надежным и простым методом оценки содержания неконденсируемых газов является измерение парциального давления неконденсирующихся газов в конденсаторе турбины ГеоЭС.

Также использовались данные Мутновской ГеоЭС по давлению парового конденсата  $P_c$  и температуре  $T_c$  на конденсаторе турбины Мутновской геотермальной электростанции за 2020 г. (Поляков, 2020). На Рис. 2 сопоставлены данные парциального давления  $P_{CO_2}$  в конденсаторе турбины с временной последовательностью инъекций даек под и вблизи вулкана Мутновский, обнаруженных в результате обработки сейсмических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН с использованием программы Frac-Digger (Kiryukhin et al, 2020, Kiryukhin et al, 2022). На Рис. 2 видно, что имеются внедрения даек, следующие за выбросами  $P_{CO_2}$  или близко синхронизированные с ними (дайки №№ 100, 101, 102, 104, 107, 108, 109, 110, 111, 114, 115, 116).

### Магмофрактинг, частота гидротермальных извержений в Мутновском кратере и землетрясений вблизи Мутновского вулкана

Важным вопросом является взаимосвязь между магмофраккингом непосредственно под и рядом с действующим Мутновским вулканом, гидротермальными взрывами в кратере вулкана Мутновский и сильными землетрясениями, вызванными субдукцией Тихоокеанской плиты, стимулирующей вулканическую активность.

Несмотря на опасность фреатомагматических извержений, кратер вулкана Мутновский является объектом повышенного туристского интереса, где в летний период (с июня по сентябрь) число посетителей может достигать до 300 человек в сутки. Еще одной угрозой являются сильные землетрясения. Согласно долгосрочному сейсмическому прогнозу (Федотов и др., 2019), в

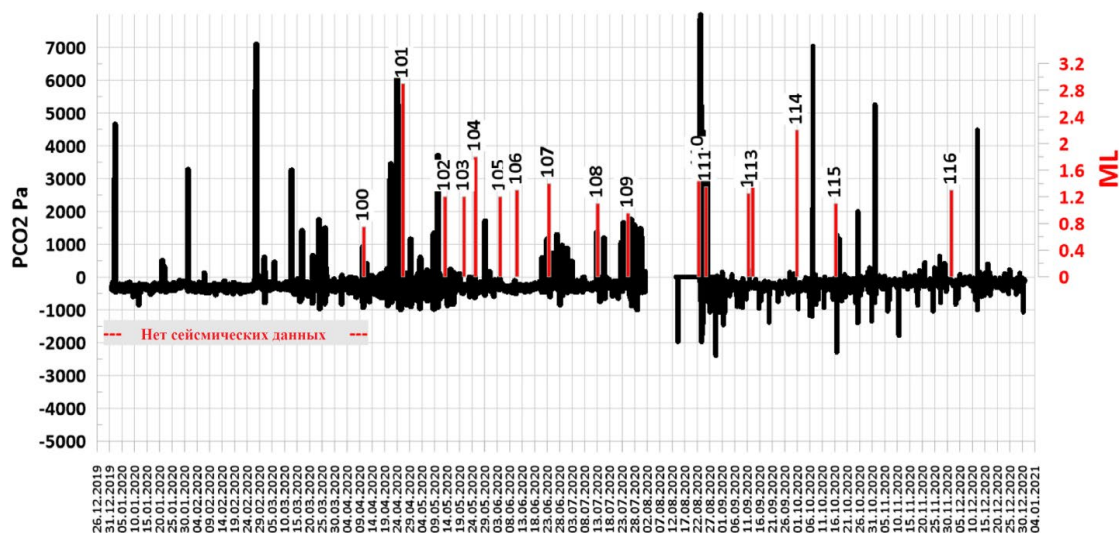


Рисунок 2 –  $PCO_2$  (Па) в конденсаторе турбины Мутновской ГеоЭС (2020 г.) внедрение даек (ML) в продуктивный пласт в зависимости от времени

прибрежной зоне, прилегающей к территории Мутновской ГеоЭС, находится одна из двух наиболее опасных сейсмических брешей во всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоне. Пятилетняя вероятность сильнейшего ( $M \geq 7,7$ ) землетрясения в Петропавловске-Камчатском составляет около 20%, что в несколько раз превышает среднегодовое значение. На рис. 3 объединены события магмофраккинга (дайки) под вулканом Мутновский и в его окрестностях с сильными землетрясениями ( $K_s > 13,5$ ,  $ML > 6,0$ , на расстоянии менее 125 км) и фреатоматмическими взрывами в кратере вулкана Мутновский в период с 2000 по 2021 гг. Обнаружение магмофраккинга стало возможным только после 2009 г., поскольку ранее здесь не было сейсмической сети. Здесь прослеживается кратерная предэруптивная последовательность даек, которая длилась 5 лет до извержения 24.03.2018. С 04.2020 появилось новое поколение даек, закончившееся оползнем Мутновского кратера 18.08.2021. Четырем сильным землетрясениям ( $M > 6$ ), произошедшим на расстоянии порядка 125 км от вулкана Мутновский, предшествовали гидротермальные извержения (взрывы) в кратере Мутновского вулкана в 2007, 2013 и 2018 годах в диапазоне времен от 1,5 месяцев до 1,3 года. Возможным механизмом таких предвестников может быть активация флюидогенеза в погружающейся плите, что может привести к усилению магматического питания и сдвигу региональных сейсмогенных разломов с задержкой во времени.

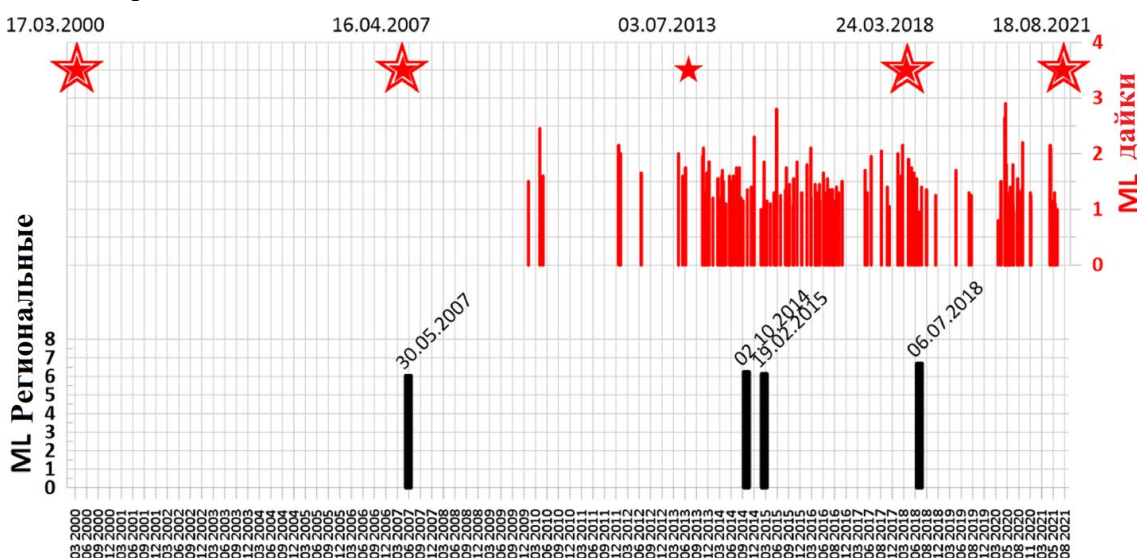


Рисунок 3 – Мутновский магмофраккинг (дайки показаны красными столбиками ML), кратерные извержения и оползень 18.08.2021 (звездочки, наиболее значимы двойные звездочки) и сильные региональные землетрясения ( $ML > 6,0$ , расположенные на расстоянии менее 125 км)

## Новый продуктивный гидротермальный резервуар

Анализ плоскоориентированных кластеров, используемый для выявления разломов на Мутновском геотермальном месторождении, представлен в (Kiryukhin et al, 2018, Kiryukhin et al, 2020, Kiryukhin et al, 2022). Ориентация разломов (азимут падения от 113 до 157°, угол падения от 46 до 50°) точно совпадает с ориентацией системы магмофраккинга, что указывает на возможное участие магматических процессов в формировании разломов на Мутновском геотермальном месторождении. Магмофраккинг в северо-восточном секторе Мутновского вулкана регистрируется на площади 30,3 км<sup>2</sup>, (Рис. 1), глубины от –4 до –2 км. По данным Na-K геотермометра (скважины 022 и 035) пластовые температуры находятся в диапазоне 254–366°С. Этот потенциальный продуктивный резервуар, значительно увеличивает площадь эксплуатируемого в настоящее время Мутновского геотермального месторождения, текущая площадь которого: 2,9 км<sup>2</sup> (62 МВт (эл.) установленной мощности, 45 МВт (эл.) фактической мощности), с температурой 240–270°С.

### Выводы

- 1) Магмофраккинг под вулканом Мутновский, выявленный по данным наблюдений МEQ, указывает на наличие даек в северо-восточном секторе и разрывные геомеханические условия в диапазоне глубин от –4000 до –2000 м, где предполагается формирование силлов;
- 2) Инъекции магмы связаны с выделением НКГ (СО<sub>2</sub>) в продуктивных коллекторах, определяются по изменению парциального давления НКГ на конденсаторе ГеоЭС;
- 3) На основании анализа данных МEQ, в северо-восточном секторе Мутновского вулкана выявлен новый продуктивный геотермальный резервуар, площадью порядка 30 км<sup>2</sup>
- 4) Магмофраккинг под вулканом Мутновский связан с гидротермальными взрывами и оползнями (2009–2021 гг.), следовательно, анализ динамики магмофраккинга, включая мониторинг парциального давления НКГ на ГеоЭС, может служить предупредительным инструментом при планировании туристических поездок в кратер вулкана Мутновский.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЯОПН в рамках научного проекта № 21-55-50003 ЯФ\_а «Магматический фраккинг и флюидные потоки в вулканических структурах».*

### Список литературы

1. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019 V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017-V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП / С.А. Федотов, А.В. Соломатин // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6–22.
2. Поляков А.Ю. Удаленный мониторинг динамики поступления магматического газа в геотермальный резервуар на базе станции НОВО RX 3000 / А.Ю. Поляков // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020), 3-8 сентября 2020 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 90–93.
3. Kiryukhin A.V. Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, O.O. Usacheva et al. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. P. 36–55.
4. Kiryukhin A. Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations / A. Kiryukhin, E. Chernykh, A. Polyakov et al. // Geosciences. 2020. 10, 52. P. 1–16, DOI: 10.3390/geosciences10020052.
5. Kiryukhin A.V. Magma fracking and production reservoirs beneath and adjacent to Mutnovsky volcano based on seismic data and hydrothermal activity / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, Voronin P.O. et al. // Geothermics. 2022. Vol. 105, 102474, P. 1–28, DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102474.

## **Вариации микросейсмических шумов перед Кударинским землетрясением 09 декабря 2020 г. с $M_w=5,6$**

**А.А. Добрынина<sup>1,2</sup>, В.А. Саньков<sup>1</sup>, С.А. Борняков<sup>1</sup>, С.А. Король<sup>1</sup>, А.В. Саньков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
dobrynina@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

Кударинское землетрясение с  $M_w = 5,6$  произошло 9 декабря 2020 г. в 21:44:33,7 по Гринвичу в дельте р. Селенги (оз. Байкал). Землетрясение сопровождалось 72 афтершоками с энергетическими классами от 12,2 до 5,3. В работе были проанализированы вариации микросейсмических шумов, полученные на широкополосной станции KYD (эпицентральное расстояние 37 км) до и после землетрясения. За 10 дней до землетрясения на сейсмограмме наблюдается постепенно увеличение амплитуд колебаний в частотном диапазоне от 0,01 до 0,1 Гц. Максимальное увеличение амплитуд колебаний составляет 19,5 относительно фона. Увеличение фона наблюдалось также в течение 4 дней после главного толчка. За это время было зафиксировано 23 афтершока. Поляризационный анализ микросейсмического шума показал четко выраженную ориентацию колебаний в юго-восточном направлении (средний азимут – 121°), что хорошо согласуется с азимутом на эпицентр основного толчка – 125°. Анализ сейсмограмм за последующий период (с 13 декабря) после Кударинского землетрясения подобных эффектов в поле микросейсмических шумов не показал. По-видимому, в поле микросейсмических шумов отразился процесс медленной подвижки по разлому перед землетрясением и после основного срыва (толчка) с последующим затуханием.

**Ключевые слова:** микросейсмический шум, предвестник, Кударинское землетрясение

## **Ambient Noise Variations before the Kudara Earthquake, 09 December 2020, $M_w=5,6$**

**Anna Dobrynina<sup>1,2</sup>, Vladimir Sankov<sup>1</sup>, Sergey Bornyakov<sup>1</sup>, Svetlana Korol<sup>1</sup>, Alexey Sankov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup>*Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

The Kudara earthquake occurred on December 9, 2020 at 21:44:33,7 UTC in the delta of the river Selenga (Lake Baikal), moment magnitude  $M_w=5,6$ . The earthquake was accompanied by 72 aftershocks with energy classes from 12,2 to 5,3. The paper analyzed the ambient noise variations obtained at the KYD broadband seismic station (epicentral distance – 37 km) before and after the earthquake. 10 days before the earthquake, the seismogram shows a gradual increase in oscillation amplitudes in the frequency range from 0,01 to 0,1 Hz. The maximum increase in oscillation amplitudes is 19,5 relative to the background. An increase in oscillation amplitudes was also observed for 4 days after the main shock. During this time, 48 aftershocks were recorded. The polarization analysis of ambient noises showed a clearly visible orientation of oscillations in the southeast direction (average azimuth – 121°), which is in good agreement with the azimuth to the epicenter of the main shock – 125°. The analysis of seismograms for the rest period (since December 13) after the Kudara earthquake showed no such effects in the field of ambient noises. Apparently, the process of slow movement along the fault before the earthquake and after the main disruption (shock) followed by attenuation was reflected in the field of ambient noises.

**Keywords:** ambient noise, precursor, Kudara earthquake

Преобладающее большинство землетрясений, как правило, связаны с подвижками по уже существующим разломам или с разрастанием разломов. Микросейсмические колебания природного происхождения несут в себе информацию обо всем многообразии деформационных процессов, происходящих в земной коре на различных энергетических уровнях, – от перемещений тектонических плит и связанных с ними катастрофических землетрясений до лунно-солнечных приливных деформационных процессов и микроземлетрясений. В последние

годы широко развиваются способы сейсмического мониторинга, основанного на выделении и анализе компонент волнового поля микросейсм и микросейсмических шумов, которые направлены на получение прогностических данных (Saltykov, 2017; Sobolev et al., 2008; Любушин, 2011; Korol et al., 2022). Примером удачного прогноза сейсмического события по микросейсмам является прогноз катастрофического землетрясения Тохоку (Япония) 11 марта 2011 г. с магнитудой  $M=9$  (Любушин, 2011; Sobolev et al., 2008). Хорошо зарекомендовала себя методика выделения предвестников землетрясений на основе анализа приливных микросейсм (Saltykov, 2017). Возможность краткосрочного прогноза для Байкальской рифтовой системы (БРС) по изменениям спектрального состава сейсмического шума перед землетрясениями показана в работах (Черных, Табулевич, 2004; Korol et al., 2022).

9 декабря 2020 г. в 21:44:34 в дельте р. Селенги произошло землетрясение с магнитудой  $M_w=5,6$  (Dobrynina et al., 2022), получившее название «Кударинское» (Рис. 1). Очаг землетрясения располагался в зоне Дельтового сброса северо-восточного простирания, типичного для центральной части БРС (Sankov, Dobrynina, 2018). Механизмы очага Кударинского землетрясения, полученные разными сейсмологическими агентствами, отражают обстановку растяжения коры в направлении СЗ-ЮВ со сбросовыми подвижками в очаге, иногда – с незначительной сдвиговой компонентой (кроме сдвигового механизма, полученного Байкальским филиалом ФИЦ ЕГС РАН, № 2 на Рис. 1).

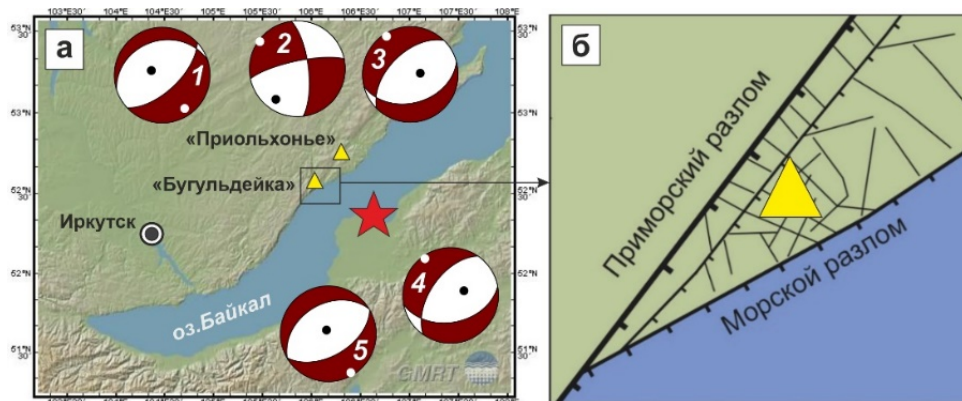


Рисунок 1 – а: положение полигонов комплексного мониторинга (треугольники) и Кударинского землетрясения (звездочка), б: разломно-блоковая структура в районе полигона «Бугульдейка».

Цифрами показаны механизмы очага: 1 – GEOFONE, 2 – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 3 – *Institute de Physique du Globe de Paris*, 4 – *Колумбийский университет, США*, 5 – *Geoscience Australia*

Близ западного борта оз. Байкал расположены полигоны комплексного мониторинга опасных геологических процессов ИЗК СО РАН – «Бугульдейка» и «Приольхонье» (Рис. 1), входящие в состав ЦПК «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН и оснащенные аппаратурой для мониторинга деформаций горных пород. На полигоне «Бугульдейка» также действует широкополосная сейсмическая станция «Куяда» (локальный код KYD, координаты:  $52,567^\circ$  с.ш.,  $106,136^\circ$  в.д., высота – 484 м). Сейсмическая станция оснащена тремя датчиками (один вертикальный и два горизонтальных) и работает в непрерывном режиме, частота дискретизации – 100 отсчетов в секунду, рабочая полоса частот от 120 сек до 108 Гц. Указанный частотный диапазон позволяет не только регистрировать землетрясения, но и фиксировать и анализировать вариации микросейсмического шума. Пункты мониторинга деформаций горных пород созданы на основе инструментального комплекса авторской разработки (Салко, Борняков, 2014). Пункт «Бугульдейка» расположен в зоне сочленения локальных разломов (Рис. 1б). Деформации здесь измеряются в ортогональных направлениях двумя горизонтальными штанговыми датчиками с базой 10 м, заглубленными в грунт на глубину 2,5 м. В пункте «Приольхонье» оборудовано две точки измерений, которые находятся в разных структурных ситуациях: первая точка располагается в зоне разлома, и измерения деформаций в ней проводятся вертикальным штанговым датчиком в скважине на базе 12 м, вторая точка расположена в пределах ненарушенного блока, измерение деформаций в ней проводятся одним

горизонтальным датчиком с базой 10 м, заглубленным на 2,5 м и ориентированным вдоль направления действия регионального растяжения.

В данных деформационного мониторинга была зафиксирована подготовка завершающей фазы Кударинского землетрясения на пунктах «Бугульдейка» и «Приольхонье» (расстояния до эпицентра – 37 и 45 км, соответственно, Рис. 1а). Несмотря на относительно близкое расположение пунктов мониторинга «Бугульдейка» и «Приольхонье» признаки готовящегося землетрясения проявились в них по-разному. В первом пункте они выразились в синусоидальной реализации деформаций с возрастанием амплитуды колебаний в течение месяца, предшествующего землетрясению. Во втором пункте в первой точке за десять дней до него начался экспоненциальный рост деформаций, во второй точке визуальных признаков подготовки землетрясения не выявлено (Семинский и др., 2022). В настоящей работе сделана попытка определить возможные предвестники Кударинского землетрясения по широкополосным сейсмическим данным.

Ранее нами были выявлены проявления возможных предвестников близких сильных и умеренных землетрясений БРС на эпицентральных расстояниях до 80 км, выразившихся в понижении уровня микросейсмического шума за периоды от нескольких часов до десятков минут до толчка в частотной области от 0,5 Гц и выше (Korol et al., 2022). В случае Кударинского землетрясения значимых изменений в амплитудно-частотном составе микросейсмических колебаний для указанных частот выявлено не было (Korol et al., 2022), поэтому мы анализировали низкочастотный диапазон – от 0,01 до 0,5 Гц.

Сейсмическая станция «Куяда» начала работу в непрерывном режиме с 30 ноября 2020 года (т.е. за 10 дней до Кударинского землетрясения), что затрудняет анализ непосредственно фоновых колебаний до землетрясения. В настоящей работе анализировался временной период от начала регистрации и до апреля 2022 года, для того чтобы оценить характеристики микросейсмического шума в спокойном состоянии.

Анализ микросейсмического шума в интервале от 0,01 до 0,5 Гц выявил периодическое увеличение амплитуд колебаний по горизонтальным компонентам в частотном диапазоне 0,01–0,1 Гц за период от 10 дней до Кударинского землетрясения и до 4 дней – после (до 20 часов 13 декабря, Рис. 2). За указанный период (с 09 по 13 декабря 2020 г.) было зафиксировано 48 афтершоков Кударинского землетрясения с энергетическими классами от 12,2 до 6,1 (Тубанов и др., 2021). За 14 часов до Кударинского землетрясения и 9 часов после него наблюдалось максимальное увеличение амплитуд колебаний – максимум составил 19,5 относительно спокойного фона (Рис. 2).

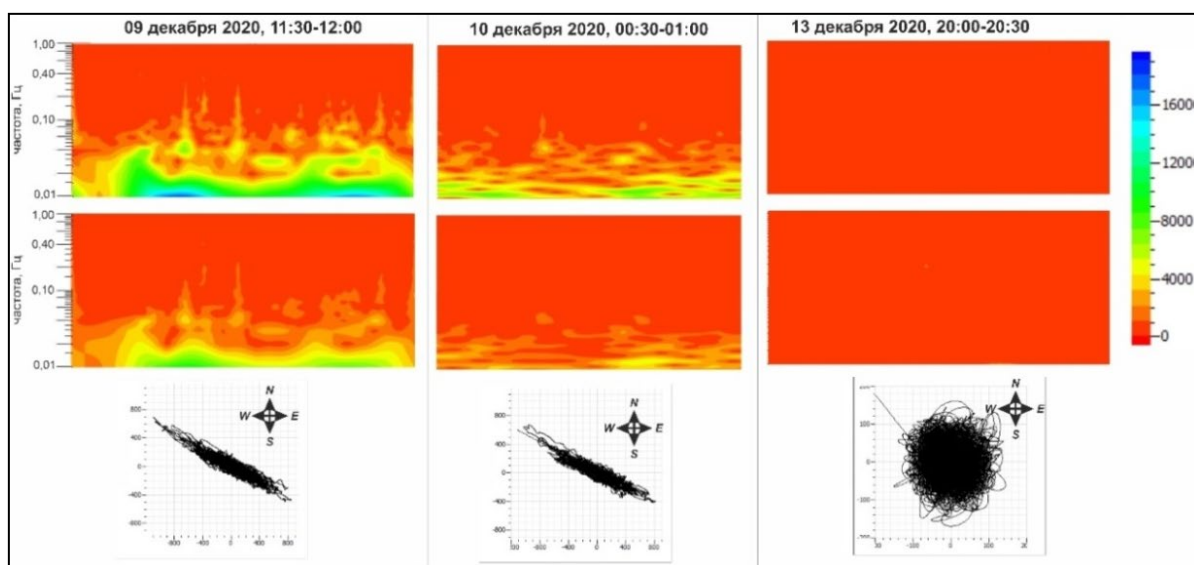


Рисунок 2 – Спектрограммы и поляризационные диаграммы 30-минутных записей микросейсмического шума в разные периоды времени до и после Кударинского землетрясения.



Увеличение амплитуд микросейсмического шума для всего 14-дневного периода сопровождалось четко выраженной сменой ориентации колебаний – поляризационный анализ микросейсмического шума показал четко выраженную ориентацию колебаний в юго-восточном направлении (средний азимут – 121°, Рис. 2), что хорошо согласуется с азимутом на эпицентр основного толчка – 124,6°. Сравнение спектрограмм и поляризации по трем компонентам (N-S, E-W и вертикальная) показало, что усиление колебаний наблюдалось только для горизонтальных компонент, для амплитуд вертикальной компоненты значительных изменений не обнаружено. Диаграммы направлений движений частиц (поляризационные диаграммы, Рис. 2) показали, что движения происходили в горизонтальной плоскости, что говорит о доминировании в поле микросейсмических шумов объемных волн сжатия и растяжения. Для фоновых микросейсмических шумов выраженной ориентации колебаний не обнаружено (Рис. 2).

Сопоставление данных деформационного и микросейсмического мониторинга позволяют сделать предположение о том, что в поле микросейсмических шумов, по-видимому, отразился процесс медленной подвижки по разлому перед землетрясением и после основного срыва (толчка) с последующим затуханием.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 21-55-53019-ГФЕН\_a.*

### **Список литературы**

1. Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам / А.А. Любушин // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 9–35
2. Салко Д.В. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах / Д.В. Салко, С.А. Борняков // Приборы. 2014. № 6. С. 24–28.
3. Семинский К.Ж. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты / К.Ж. Семинский, А.А. Добрынина, С.А. Борняков и др. // Геодинамика и тектонофизика. 2022. В печати.
4. Тубанов Ц.А. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. (Mw=5.5) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений / Ц.А. Тубанов, Д.П.-Д. Санжиева, Е.А. Кобелева и др. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48. № 4. С. 32–47.
5. Черных Е.Н. О создании базы данных по сейсмическим шумам / Е.Н. Черных, В.Н. Табулевич // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов. Архангельск: Институт экологических проблем севера УРО РАН, 2004. Т. 2. С. 357–361.
6. Dobrynina A.A. Analysis of the Seismic and Ionospheric Effects of the Kударinsky Earthquake on December 9, 2020 / A.A. Dobrynina, N.P. Perevalova, V.A. Sankov et al. // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. № 13 (2s), 0622. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2s-0622
7. Korol S.A. Ambient Seismic Noise Variations before Earthquakes in the Baikal Rift System / S.A. Korol, A.V. Sankov, A.A. Dobrynina, V.A. Sankov // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. № 13 (2s), 0632.
8. Saltykov V.A. On the Possibility of Using the Tidal Modulation of Seismic Waves for Forecasting Earthquakes / V.A. Saltykov // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. № 53 (2). С. 250–261.
9. Sankov V.A. Active faulting in the Earth's crust of the Baikal rift system based on the earthquake focal mechanisms / V.A. Sankov, A.A. Dobrynina // Moment Tensor Solutions. Springer Natural Hazards. Springer, Cham., 2018. P. 599–618.
10. Sobolev G.A. Asymmetrical Pulses, the Periodicity and Synchronization of Low Frequency Microseisms / G.A. Sobolev, A.A. Lyubushin, N.A. Zakrzhevskaya // Journal of Volcanology and Seismology. 2008. № 2. С. 118–134.

## **Флуктуации термодинамических параметров гидротермальной системы как отклик системы на внешние воздействия**

**Ю.Д. Кузьмин, В.А. Сергеев, С.А. Остроухов**

*Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук»,  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
kuzy@emsd.ru*

Данная работа является продолжением работы (Кузьмин, 2020) и поиском подтверждения гипотезы, высказанной в (Кузьмин, 2021), о влиянии ультранизкочастотных (УНЧ) геомагнитных колебаний, генерируемых в магнитном поле планеты, на поверхностные и глубинные геофизические и геохимические процессы.

**Ключевые слова:** гидротермальная система, ультранизкочастотные колебания, тепло, воздействия

## **Fluctuations of thermodynamic parameters of a hydrothermal system as a response of the system to external influences**

**Yury Kuzmin, Vasily Sergeev, Sergey Ostroukhov**

*Kamchatka branch of the Geophysical Survey of the RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

This work is a continuation of work (Kuzmin, 2020) and a search for confirmation of the hypothesis expressed in (Kuzmin, 2021) about the influence of ultra-low-frequency (ULF) geomagnetic oscillations generated in the planet's magnetic field on surface and deep geophysical and geochemical processes.

**Keywords:** hydrothermal system, ultra low frequency vibrations, heat, impacts

### **Введение**

Любая идея или гипотеза, как правило, проходит следующие три стадии: 1) появление идеи, гипотезы; 2) умозрительная, аналитическая проверка гипотезы; 3) постановка и проведение эксперимента. Высшим критерием проверки всякой гипотезы является эксперимент. Наличие жидкой воды и внутреннего тепла планеты Земля делают ее уникальной в Солнечной системе. Гипотеза о происхождении поверхностной пресной воды на Земле опубликована в (Кузьмин и др., 2020). Предложенная нами гипотеза предполагает изначально холодное образование планет Солнечной системы, в том числе и планет земной группы, на которых нагрев твердых поверхностей Солнцем способствовал образованию воды и эволюции геологических процессов, характерных для каждой планеты. Гипотеза базируется на экспериментах и теории взаимодействия водорода с кислородом, разработанной отечественными и иностранными учеными, а также на изотопных исследованиях воды в разных средах. Данная гипотеза позволяет уйти от общепринятой гипотезы метеоритно-кометного происхождения воды на Земле к гипотезе соответствующей физическим законам и логически непротиворечивым представлениям о происхождении воды, образовании Земной коры, Мирового океана и процессов в этих геосферах, которые позволяют предложить новые пути происхождения источника внутреннего тепла планеты. Общепринятого представления о происхождении внутреннего тепла планеты нет. В разные времена рассматривались, в качестве основного источника внутреннего тепла Земли: тепло радиоактивного распада долгоживущих изотопов вещества в ядре планеты; гравитационная дифференциация вещества; приливное трение; метаморфизм, фазовые переходы и др. Было даже высказано предположение, что источником внутреннего тепла планеты является тепло трения между разноскоростными слоями внешнего ядра Земли. (Летников, 2001). Некоторое время была популярной гипотеза о радиоактивном разогреве Земли, которой придерживались и наши ведущие геологи В.И. Вернадский, А.П. Виноградов и др., но, как

показал вулканолог Л.К. Грейтон (Грейтон, 1949), после анализа и экспериментов с радиоактивным нагревом, уже 1949 г. от этой гипотезы пришлось отказаться.

### **Основные положения**

Благодаря уникальным физическим и химическим свойствам воды, вода активно участвует во всех геофизических и геохимических процессах планеты, изменяя ее облик и эволюционируя вместе с ней. Способность воды и ее растворов проникать вглубь планеты позволяет ей взаимодействовать на разных глубинах со щелочами, щелочноземельными металлами и другими первородными веществами планеты, в результате которых происходят экзотермические метасоматические химические реакции с выделением тепла. Предполагают, что тепло этих реакций нагревает среду, в которой происходят эти реакции, до 150 °С и выше (Котина, 1969). Увеличение тепла приводит к активизации процессов взаимодействия вода – порода, активации химических реакций и геохимических процессов, в результате которых пресная вода наземной гидросферы, проникающая вглубь планеты, с увеличением глубины становится более минерализованной и электропроводящей.

Геомагнитные пульсации, в современной терминологии – ультранизкочастотные (УНЧ) геомагнитные колебания, рассматриваемые в магнитном поле Земли (МПЗ) внешнего происхождения (Кузьмин и др., 2001), в отличие от общепринятого МПЗ внутреннего происхождения, генерируются на границе МПЗ в результате взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой. Таким образом, в МПЗ возникают электромагнитные колебания в широком диапазоне частот, от миллигерц до нескольких герц (Гулельми, 1985). В электропроводящих водонасыщенных горных породах и водных растворах, приуроченных к разломам и разломным зонам, они, за счет наведенных теллурических токов, преобразуются в тепло, нагревая водосодержащую геологическую среду земной коры. Совместное тепло экзотермических реакций и тепла, полученного в результате преобразования электромагнитной энергии УНЧ колебаний, образуют источники внутреннего тепла планеты. Это тепло и, следовательно, эндогенная активность планеты будут являться ее атрибутами до тех пор, пока существует Солнце, вода и магнитное поле Земли. С ростом земной коры теплоизоляция водовмещающих горных пород также растет и поддерживается за счет высокого теплосодержания жидкой воды и, особенно перегретого водяного пара, имеющего теплосодержание значительно больше, чем у жидкой воды. Теплоизоляционная среда, аккумулируя внутреннее тепло, может нагреваться до высоких температур, вплоть до образования магматических очагов. Таким образом, можно предположить, что по данному механизму образования внутреннего тепла в земной коре образуются не только магматические очаги, но и гидротермальные системы, не связанные с теплом, рядом расположенных вулканов. Подобное предположение было высказано В.А. Аверьевым, (Аверьев, 1964) который считал, что термоаномалии, порождающие гидротермальные системы в вулканических областях, связаны с определенными зонами в земной коре, по которым поднимается эндогенный пар. Согласно расчетам, генерация таких термоаномалий может происходить на глубинах в десятки километров, т.е. в нижних горизонтах земной коры. В этом случае огромное значение приобретают глубинные разломы и зоны дробления пород. Исходя из высказанных соображений, можно сделать предположение об образовании гигантского планетарного термостата с внутренним теплом, которое генерируется в подземной гидросфере земной коры. При этом, на данное космическое образование будут воздействовать источники энергии космического и атмосферного происхождения, такие как: гравитационные – лунно-солнечные приливы; электромагнитные – солнечная радиация; метеорологические и др., которые за счет разнообразных геофизических и геохимических взаимодействий со средой планеты приведут к изменению внутреннего тепла и, следовательно, изменению активности эндогенных процессов: тектонических, вулканических, поверхностного теплового потока и др.

### **Наблюдения**

Для подтверждения предположения о влиянии космических факторов (лунно-солнечных приливов и солнечной радиации) на гидротермальную систему, как высокочувствительную энергонасыщенную среду подземной гидросферы, способную

воспринимать и реагировать на внешние воздействия, был организован пункт термодинамических наблюдений на глубокой скважине Верхне-Паратунской гидротермальной системы (Южная Камчатка) (Кузьмин, 2020). Отсутствие в спектральном составе термодинамических колебаний суточной гравитационной составляющей – лунных приливов поставило вопрос о необходимости расширения наблюдений, с организацией дополнительного канала синхронной регистрации солнечной активности в виде измерения напряжений теллурических токов в районе скважины. Данный метод наблюдений был разработан В.А.Троицкой в 50-х годах прошлого века в виде нового направления в геофизике – диагностики состояния магнитосферы на основе наземных наблюдений геомагнитных пульсаций. Это позволило проводить непрерывный мониторинг состояния околоземного пространства, который показал, что взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли генерируют УНЧ колебания в широком диапазоне частот и играют ключевую роль в динамике изменений магнитного поля Земли. Эти колебания индуцируют теллурические токи в электропроводящих средах Земли на разных глубинах и несут не только информацию о взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли, но и преобразуют электромагнитную энергию УНЧ колебаний магнитного поля Земли в тепло в электропроводящих средах планеты. Являясь составной частью внутреннего тепла планеты, наведенное тепло изменяет ее тепловой режим и, следовательно, эндогенную активность планеты. Таким образом, эндогенная активность планеты является откликом солнечной активности, что подтверждается многими работами разных авторов в разных регионах Земли в том числе и на Камчатке.

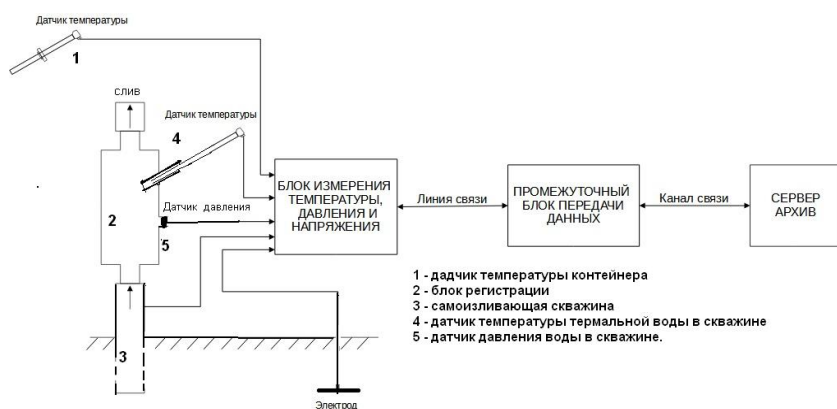


Рисунок 1 –  
 Схема измерений  
 на скважине ГК=37

Для регистрации теллурических токов была организована линия, с двумя электродами, из которых одним являлся ствол скважины, в которой измеряются термодинамические параметры ГТС, а вторым – свинцовый электрод, закопанный в землю на расстоянии 120 м от скважины. Схема измерений на данном пункте наблюдений представлена на Рис. 1.

Фрагмент регистрации флуктуаций на скважине ГК-37 приведен на Рис. 2.

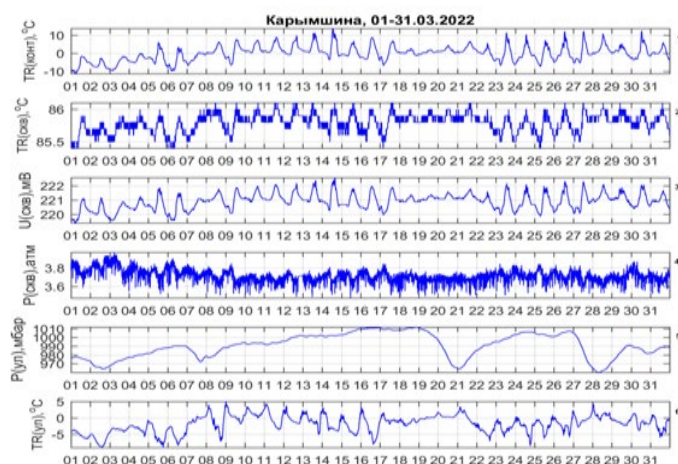


Рисунок 2 – Графики измерений:  
 1) температура контейнера, °C;  
 2) температура термальной воды на изливе скважины, °C;  
 3) э.д.с. наведенных теллурических токов, мВ;  
 4) давление термальной воды в скважине, атм;  
 5) метео – атмосферное давление, мбар;  
 6) метео - температура воздуха, °C

## **Выводы**

1. Графики показывают, что изменения поверхностной температуры (температура металлического контейнера над скважиной), флуктуации температуры и давления термальной воды на устье самоизливающейся скважины синхронны с флуктуациями теллурических токов.

2. Флуктуации давления в скважине несколько отстают от флуктуаций температур термальной воды.

3. На все зарегистрированные флуктуации оказывает влияние солнечная активность.

4. Влияний лунных приливов не наблюдается.

Все наблюдения проводятся по местному времени. Данные выводы предполагают дальнейшее продолжение наблюдений.

*Авторы благодарны к.ф.-м.н Хомутову С.Ю. за обсуждение статьи и помощь в оформлении графиков Рисунка 2.*

## **Список литературы**

1. *Аверьев В.В.* О соотношении между гидротермальной и магматической деятельностью / *В.В. Аверьев* // Проблемы вулканизма. Петропавловск-Камчатский: Дальневост. Кн. издательство, 1964. С. 251–253.

2. *Гулельми А.В.* Новый взгляд на происхождение геомагнитных пульсаций / *А.В. Гулельми* // Природа. 1985, № 4. С. 44–51.

3. *Грейтон Л.К.* Предположения о вулканическом тепле / *Л.К. Грейтон.* М.: Иностранная литература, 1949. 165 с.

4. *Кузьмин Ю.Д.* Комплексные наблюдения на Верхне – Паратунской гидротермальной системе (Камчатка) / *Ю.Д. Кузьмин* // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 56–602.

5. *Кузьмин Ю.Д.* Роль воды в эволюции Земли и планет земной группы / *Ю.Д. Кузьмин, В.Г. Сахно* // Вестник ДВО РАН. 2021. № 6. С. 130–144.

6. *Кузьмин Ю.Д.* Происхождение воды и ее роль в эволюции Земли / *Ю.Д. Кузьмин, В.Г. Сахно* // Вестник ДВО РАН. 2020. № 2. С. 115–129.

7. *Кузьмин Ю.Д.* Новый взгляд на Землю и процессы, происходящие на ее поверхности и в глубин / *Ю.Д. Кузьмин, В.И. Белоусов, В.Г. Сахно* // Вестник ДВО РАН, 2001, № 5, С. 106–123.

8. *Котина Р.П.* Модель тепловой эволюции системы с экзотермическими реакциями и некоторые вопросы палингенеза / *Р.П. Котина, М.Я. Френкель, А.А. Ярошевский* // Геохимия. 1969. № 11. С. 1370–1378.

9. *Летников Ф.А.* К проблеме источника внутреннего тепла Земли / *Ф.А. Летников* // ДАН. 2001. Т. 378, № 3. С. 387–389.

## Напряженно-деформированное состояние земной коры Северомуйского геотермального района (Байкальская рифтовая система)

В.А. Саньков<sup>1</sup>, А.И. Мирошниченко<sup>1</sup>, А.А. Добрынина<sup>1</sup>, А.В. Саньков<sup>1</sup>, А.В. Парфеевец<sup>1</sup>,  
М.А. Лебедева<sup>1</sup>, Е.Ю. Ефимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
sankov@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*ООО «ВолксКрупн-АЕ», г. Санкт-Петербург*

Северо-восточный фланг Байкальской рифтовой системы характеризуется наличием многочисленных источников термальных вод, активной разломной тектоникой, сейсмичностью и повышенными темпами современных движений земной коры. На примере детального изучения Ангараканско-Муяканского горста (Северо-Муйский хребет) выявлены закономерности эволюции позднекайнозойского и современного напряженно-деформированного состояния земной коры, полученные с использованием данных структурных, сейсмологических и геодезических методов исследований. На склонах поднятия известны термальные источники с температурой 39 °С и выше. В реконструированном позднем кайнозое напряженное состояние земной коры изменилось со сдвигового на чистое растяжение. Ось минимального сжатия имела направление СЗ-ЮЮВ и лежала горизонтально. Тензоры напряжений, рассчитанные по механизмам очагов землетрясений, указывают на текущие условия растяжения в том же направлении. Данные наземных и спутниковых геодезических измерений позволили оценить относительную скорость горизонтального удлинения земной поверхности. Современная сейсмичность региона характеризуется роевой активностью, приуроченной к средней и верхней частям разреза земной коры. Мы оценили деформации земной поверхности при прохождении роя землетрясений 2014–2015 гг. на основе данных радиолокационной интерферометрии. В районе исследований известны сильные инструментально зарегистрированные землетрясения (до  $M = 6,0$ ), а также палеосейсмодислокации – следы доисторических землетрясений с магнитудой 7,0–7,5. Термальные источники приурочены к сбросовым разломам СВ простирания, нередко сопровождающимися широкими зонами дезинтегрированных пород. Формированию зон дезинтеграции во вмещающих гранитах способствовало растяжение земной коры, обусловившее раскрытие трещин и активную миграцию ультрапресных поверхностных и горячих глубинных вод в породном массиве.

**Ключевые слова:** Байкальская рифтовая система, термальные источники, зоны разломов, палео и современное напряженное состояние, деформации, геодезия, радарная интерферометрия

## Crustal stress-strain state in the North Muya geothermal region (Baikal rift system)

Vladimir Sankov<sup>1</sup>, Andrey Miroshnitchenko<sup>1</sup>, Anna Dobrynina<sup>1</sup>, Alexey Sankov<sup>1</sup>,  
Anna Parfeevets<sup>1</sup>, Marina Lebedeva<sup>1</sup>, Evgeny Efimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup>*LLC VolksKruppAE, Saint Petersburg*

The northeastern flank of the Baikal rift system is characterized by the presence of numerous thermal water springs, active fault tectonics, seismicity and increased rates of recent movements of the earth's crust. On the example of the detailed study of the Angarakan-Muyakan horst (North Muya ridge) the patterns of evolution of the Late Cenozoic and modern stress-strain state of the earth's crust, obtained using data from structural, seismological and geodetic research methods, are shown. On the slopes of the ridge, the thermal springs with temperatures of 39 °C or more are known. The reconstructed Late Cenozoic of the crustal stress state changed from strike slip type to pure extension. The axis of minimum compression had a NW-SSE trend and lay horizontally. The stress tensors calculated from the earthquake focal mechanisms indicate the current conditions of extension in the same direction. The data of ground and satellite geodetic measurements made it possible to estimate the relative rate of horizontal elongation of the earth's surface. The modern seismicity of the region is characterized by swarm activity confined to the middle and upper

parts of the crustal section. We estimate of deformations of the earth's surface during the passage of the 2014–2015 earthquake swarm using the radar interferometry data. In the study area, strong instrumentally recorded earthquakes (up to  $M = 6.0$ ) are known, as well as paleoseismic dislocations - traces of prehistoric earthquakes with a magnitude of 7.0–7.5. Thermal springs of the Angarakan-Muyakan horst are associated with normal faults of the northeast trend, often accompanied by wide zones of disintegrated rocks. The formation of disintegration zones in the enclosing granites controlled by the crustal extension, which caused the opening of cracks and the active migration of ultrafresh surface and hot deep waters in the rock massive.

**Keywords:** Baikal rift system, thermal springs, faults zones, paleo and present day stress, strain, geodesy, RSA interferometry

### Введение

Северо-восточный фланг Байкальской рифтовой системы характеризуется активной разломной тектоникой, повышенными скоростями современных движений земной коры и тепловым потоком, наличием многочисленных выходов подземных термальных вод. Кулисное расположение активных разломов сбросового морфолого-генетического типа, предполагает наличие левостороннего сдвигового смещения к широтному отрезку Байкальской рифтовой системы, который диагностировался в (Шерман, Леви, 1977), как внутриконтинентальный трансформный разлом. На примере детально изученного Ангаракан-Муяканского горста Верхнеангарско-Муйской междувпадинной перемычки, где расположен Северомуйский тоннель БАМ, показаны закономерности развития позднекайнозойского и современного напряженно-деформированного состояния земной коры, полученные с использованием данных геолого-структурных, сейсмологических и геодезических методов исследований. Взаимодействие активной тектоники и миграции подземных вод обусловило внутреннее строение и прочностные свойства массива.

В пределах горста на трассе тоннеля известны выходы термальных подземных вод с температурами  $39\text{ }^{\circ}\text{C}$  и более, которые входят в состав локального геотермального района, именуемого здесь Северомуйским. Воды по составу сульфатно-гидрокарбонатные, гидрокарбонатные кальциево-натриевые и натриево-кальциевые (Шабынин, 2004; Алтынникова, Диденков, 2008).

Согласно данным геолого-структурных исследований, на уровне эрозионного среза и в выработках тоннеля преобладают хрупкие деформации с формированием трещин отрыва и скола, зон дробления, какиритизации и тектонической муки по позднепалеозойским гранитам. Реконструкции стресс-тензоров палеонапряженного состояния показали, что позднекайнозойское напряженное состояние земной коры эволюционировало от сдвигового типа на стадии заложения разломов к чистому растяжению. При этом ось минимального сжатия имела С-СЗ простирание и залегала горизонтально (Саньков и др., 1991).

Стресс-тензоры, рассчитанные по данным о механизмах очагов землетрясений, также указывают на современные условия растяжения в том же направлении. По результатам расчетов, как в среднем для всего разреза коры до глубины 16 км, так и для отдельных слоев, характерны условия растяжения – ось минимального сжатия (растяжения)  $\sigma_3$  современного стресса субгоризонтальна и направлена на С-СЗ, ось максимального сжатия  $\sigma_1$  - субвертикальна, а ось промежуточных напряжений  $\sigma_2$  горизонтальна и имеет В-СВ направление.

Сопоставление данных наземных полигонометрических измерений и современных измерений методом спутниковой геодезии позволило оценить относительную скорость горизонтального удлинения земной поверхности в пределах Ангаракан-Муяканского блока за 36-летний период в направлении  $300\text{--}350^{\circ}$ , которая составила первые единицы на  $10^{-7}$  в год. Измерения на локальных геодинамических полигонах с характерной длиной линий в первые километры за 3-х летний период показали более интенсивные (на 1–2 порядка) разнонаправленные горизонтальные деформации (Саньков и др., 1991). Скорости вертикальных движений по данным нивелирования достигают 5–6 мм/год (Колмогоров, 2012).

Для современной сейсмичности района характерна роевая активность, приуроченная к средней и верхней частям разреза коры, что, по-видимому, является отражением влияния активной миграции флюидов, приводящей к разупрочнению отдельных объемов недр. Для

периода проявления Муяканского роя землетрясений 2014–2015 гг. (Мельникова и др., 2016), максимальное количество событий которого концентрировалось на глубинах 2–8 км, с применением метода радарной интерферометрии (РСА) нами были получены оценки деформации земной поверхности. По данным анализа интерферограмм ALOS-2/PALSAR-2 за период 26.09.2015 – 27.09.2014 в пределах Муяканского хребта был обнаружен участок  $8 \times 4$  км, испытавший опускание с амплитудой 68 мм.

Вместе с этим на территории исследований имеются зарегистрированные за период инструментальных наблюдений эпицентры сильных землетрясений (до  $M=6,0$ ) и палеосейсмодислокации – следы доисторических землетрясений с магнитудами 7,0–7,5. Единовременные смещения по активным разломам при сильнейших палеоземлетрясениях превышали 1,5 м, что зафиксировано в рельефе земной поверхности и в разрезах рыхлых отложений.

Термальные источники приурочены к сбросовым разломам СВ простирания, нередко сопровождающимся широкими, до десятков метров, зонами дезинтегрированных пород. Формированию зон дезинтеграции во вмещающих гранитах способствовало растяжение земной коры, обусловившее раскрытие трещин и активную миграцию пресных поверхностных и горячих глубинных вод в породном массиве. Авторы работы (Ломоносова и др., 1980) связывали глинизацию гранитов в этом районе с гидротермальной метасоматической аргиллизацией трещиноватых пород зон дробления и процессами выветривания. Наличие зон дезинтеграции и их водонасыщенность существенно снижают прочность горного массива и увеличивают уровень риска при проходке горных выработок.

*Исследования проводились при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 21-55-53019-ГФЕН\_а.*

### **Список литературы**

1. *Алтынникова М.А.* Закономерности формирования вод района Северо-Муйского тоннеля БАМ / *М.А. Алтынникова, Ю.Н. Диденков* // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2008. № 6 (32). С. 152–161.
2. *Колмогоров В.Г.* Тектонофизическая интерпретация результатов многократного нивелирования в районе Северо-Муйского тоннеля трассы БАМ / *В.Г. Колмогоров* // Интерэкспо Гео-Сибирь. Новосибирск, 2012. Том 4. С. 159–164.
3. *Ломоносова Т.К.* Гидротермальные глинистые метасоматиты на северо-востоке Байкальской рифтовой зоны / *Т.К. Ломоносова, М.Г. Демьянович, Г.М. Камаева* // Проблемы теории образования коры выветривания и экзогенные месторождения. М., 1980. С. 115–120.
4. *Мельникова В.И.* Анализ результатов сейсмических наблюдений в районе Северо-Муйского тоннеля трассы БАМ / *В.И. Мельникова, Н.А. Гилёва, А.И. Середкина* // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы. 2017. С. 217–219.
5. *Саньков В.А.* Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона / *В.А. Саньков, Ю.И. Днепровский, С.Н. Коваленко, С.А. Борняков, Н.А. Гилева, Н.Г. Горбунова.* Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 111 с.
6. *Шабынин Л.Л.* Гидрогеологические условия Северо-Муйского тоннеля / *Л.Л. Шабынин*; ред. *Б.И. Писарский.* Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 94 с.
7. *Шерман С.И.* Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны / *С.И. Шерман, К.Г. Леви* // Доклады АН СССР. 1977. Т. 233, № 2. С. 454–464.



## Энергетический спектр сейсмического процесса как отражение геодинамических процессов

А.В. Соломатин

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
alf55@mail.ru*

Рассматриваются базовые идеи построения метода мониторинга динамических процессов в зонах субдукции на основе параметров сопровождающего эти процессы потока сейсмических событий. Базовым для предлагаемого метода является расширенное представление об энергетическом спектре сейсмического процесса, первым приближением которого является закон повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера. Возможности разрабатываемого метода продемонстрированы на примере одной из наиболее сейсмически опасных согласно данным долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) сейсмических брешей Курило-Камчатского региона в районе г. Петропавловск-Камчатский. Объективность представления полученных результатов в терминах геодинамики подтверждаются в этом случае примером сопоставления с результатами наблюдений на Петропавловском Геодинамическом Полигоне (ППП).

**Ключевые слова:** сейсмогенная зона, разломная структура, сейсмический процесс, закон Гутенберга-Рихтера, энергетический спектр, геодинамика, флюиды, сейсмический мониторинг, сейсмический прогноз

## Energy spectrum of the seismic process as a reflection of geodynamic processes

Aleksey Solomatin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

The basic ideas of constructing a method for monitoring dynamic processes in subduction zones based on the parameters of the flow of seismic events accompanying these processes are considered. The basis for the proposed method is an expanded understanding of the energy spectrum of the seismic process, the first approximation of which is the Gutenberg-Richter earthquake recurrence law. The capabilities of the developed method are demonstrated by the example of one of the most seismically dangerous seismic gaps in the Kuril-Kamchatka region in the area of Petropavlovsk-Kamchatsky, according to the data of the long-term seismic forecast (DSSP). The objectivity of the presentation of the obtained results in terms of geodynamics is confirmed in this case by an example of comparison with the results of observations at the Petropavlovsk Geodynamic Polygon (PGP).

**Keywords:** seismogenic zone, fault structure, seismic process, Gutenberg-Richter law, energy spectrum, geodynamics, fluids, seismic monitoring, seismic forecast

### Введение

В работе используются следующие важнейшие понятия и представления об их роли в развитии очагов сильнейших землетрясений, прежде всего, – Курило-Камчатской сейсмогенной зоны:

– сегментация сейсмогенной зоны поперек ее простирания, которая определяет долгосрочные закономерности развития сейсмического процесса, в частности – долговременные закономерности развития очагов сильнейших региональных землетрясений (Федотов, Соломатин, 2015);

– региональная периодичность сейсмического процесса, которая гипотетически определяется региональными вариациями тектонических напряжений и, в свою очередь, определяет развитие очагов сильнейших землетрясений на заключительной его стадии (Соломатин, 2014);

– влияние на сейсмический процесс флюидной компоненты, в максимальной степени также проявляющееся на заключительной стадии развития очагов сильнейших землетрясений; это

влияние гипотетически синхронизирует процесс разрушения в готовящихся очагах с указанными выше периодическими вариациями (Киссин, 2021; Соломатин, 2021).

Все эти представления лежат в основе разрабатываемой автором концепции *двухтактной флюидодинамической модели развития очагов сильнейших землетрясений* на завершающей стадии этого развития.

В качестве инструментов построения и исследования такой модели в настоящем исследовании предлагаются следующие представления:

– представление о флюидодинамической природе разломных нарушений в широком диапазоне пространственных масштабов на основе выделения плоскоориентированных кластеров гипоцентров землетрясений (Kiryukhin et al, 2016; и др.);

– представление об энергетическом спектре сейсмического процесса, являющееся развитием представлений о распределении величин землетрясений (в шкале обобщенного энергетического класса) на основе закона Гутенберга-Рихтера;

– представление о влиянии флюидодинамики в сейсмогенной зоне на энергетический спектр сейсмического процесса;

– последнее представление развивается в настоящей работе, а весь комплекс приведенных выше представлений может быть использован для построения обобщенного сценария развития очагов сильнейших землетрясений и их прогноза, а также мониторинга соответствия текущего развития сейсмического процесса сценарию на стадии сопровождения уже данных прогнозов.

### **Построение параметров энергетического спектра сейсмического процесса $\gamma$ на основе энергетических классов выборки землетрясений**

Используем представления (Соломатин, 2021) об обобщенном энергетическом классе  $K^F$  для которого величина параметра  $\gamma$  в случае представительных выборок стремится к значению  $1/2$ . В случае представительности выборок, в шкале  $K^F$  (в дальнейшем просто  $K$ ) закон Гутенберга-Рихтера выполняется по построению – строго, и при указанной фиксированной величине  $\gamma$  энергетический спектр может считаться базовым.

Для частных выборок параметр  $\gamma$  является самой первой и приближенной оценкой реального энергетического спектра сейсмического процесса. Представим его для некоторой выборки сейсмических событий с величинами  $K$  на основе оценки максимального правдоподобия:

$$\gamma = \text{Lg}(e)/(K_{\text{med}} - K_{\text{min}}) - (Aki, 1965). \quad (1)$$

Эта формула и в значительной мере характеризует весь диапазон энергетического спектра сейсмического процесса. Однако при выводе этой формулы использовалось представление о линейности закона Гутенберга-Рихтера. В случае вполне естественных отклонений от этой гипотезы параметр  $\gamma$  в указанном представлении в большей степени определяется распределением многочисленных относительно слабых сейсмических событий.

Для введения симметричной ей оценки выполним следующее преобразование:

$$P(K) = 1 - 1/S(K), \quad (2)$$

где  $S(K) = 10^{((K - K_{\text{min}})/2)}$  - условная нормированная деформация по Бенъофу.

В (2) использовано полезное представление о «Р-мере», применение которой к исследуемому параметру приводит к монотонному ограничению полученных значений диапазоном от 0 до 1 и равномерному их распределению.

Выполнив преобразование  $P'(K) = 1 - P(K)$ , а затем преобразование, обратное (2), получим «дополнение» к энергетическому классу  $K$ :

$$K' = 2 \times \text{Lg}(1 - 10^{((K_{\text{min}} - K)/2)}). \quad (3)$$

Применив для него, как выше, формулу (1), получим параметр  $\gamma'$  – еще одну оценку наклона графика повторяемости для исследуемой выборки значений  $K$ .

Для мониторинга сейсмического процесса удобно от суммарных по выборкам параметров перейти к их поточечным, а затем – к кумулятивному представлению их вариаций уже во времени.

Для этого выражение (1), перейдя от осреднения по выборке к единственному значению и используя (2), заменим на выражение:

$$\text{Lg}(e)/(2 \times \gamma(t)) = \text{Lg}(P(t)), \quad (4)$$

где произведена формальная замена  $K \rightarrow t$  для временного ряда  $K(t)$ , представляющего исследуемую выборку.

Полезность такого представления очевидна при рассмотрении аналогичного преобразования для  $K'$ :

$$\text{Lg}(e)/(2 \times \gamma'(t)) = \text{Lg}(1 - P(t)) \quad (5)$$

Функции (4) и (5), можно дополнить третьей, аналогичной, но симметричной относительно середины диапазона –  $P = 0,5$ :

$$h(t) = -(P(t) \times \text{Lg}(P(t)) + (1 - P(t)) \times \text{Lg}(1 - P(t))) \quad (6)$$

Точный вид функции (6), впрочем, как и функций (4) и (5), большой роли для дальнейших оценочных построений не играет, выражение (6) выбрано условно, совпадающим по форме с симметричной мерой, используемой при построении информационной энтропии Шеннона.

### **Выделение главных компонент временных вариаций сейсмического спектра и вариаций сейсмической активности**

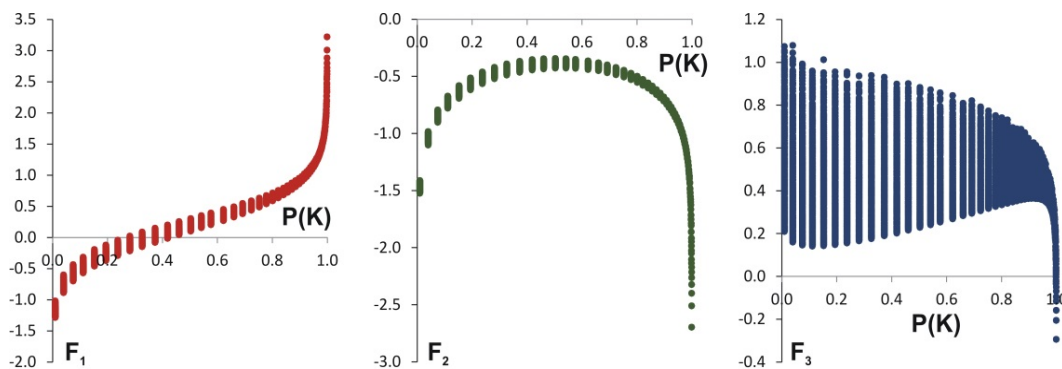
Представим в использованной выше  $P$ -мере еще один, дополнительный, параметр  $A(t)$ , отражающий уровень сейсмической активности:

$$A(t) = 1 - [(1 - P(K(t))) \times (1 - P(\Delta t(t)))]^{1/2}, \quad (7)$$

Величина параметра  $A(t)$  близка к максимуму при близости к максимуму величин:  $P(K(t))$  или  $P(\Delta t(t))$  - большие по величине события или короткие интервалы времени между ними, что обычно принято определения уровня сейсмической активности.

В целом значения всех трех «вероятностных» параметров имеют распределение, приближенное к равномерному, однако, величина  $A(t)$  имеет ограничение в области наименьших значений, что оптимально для выделения сейсмических активизаций, но применение к нему понятия « $P$ -мера» уже условно.

Для построения ортогональных компонент на основе введенных выше не ортогональных, вообще говоря, параметров был использован многопараметрический анализ методом главных компонент. С его помощью были выделены три условно ортогональные компоненты:  $F_1(K)$ ,  $F_2(K)$ ,  $F_3(K)$ , рис. 1.



*Рисунок 1 – Отображение условно ортогональных параметров  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  в качестве функций обобщенного энергетического класса  $K$*

Наибольшая компонента  $F_1$ , максимально отражает вариации наклона графика повторяемости в допущении его прямолинейности, что в основном соответствует построениям выше. Компонента  $F_2$  отражает изменения концентрации значений параметра  $K$

в средней части их диапазона, что в значительной степени эквивалентно выделению «изломов» графика повторяемости. Наименьшая компонента  $F_3$  отражает появление достаточно редких – максимальных по величине сейсмических событий.

В соответствии с таким представлением в качестве гипотезы ожидается, что компонента  $F_1$  отражает в основном вариации нормальных напряжений,  $F_2$  – тангенциальных, а  $F_3$  – влияние притока флюидов.

В верхней части рис. 2 представлен интегральный, за вычетом среднего, ход компоненты  $F_1$  для двух областей сейсмогенной зоны Камчатки: Авачинского и Камчатского заливов. В первом случае В.А. Гавриловым наблюдались сопутствующие аномалии на Петропавловском геодинамическом полигоне (ПГП) – нижняя часть рис. 2.

Подобие с задержкой по времени вариаций компоненты  $F_1$  в двух удаленных участках позволяет предположить прохождение деформационной волны, отражаемой отрицательными значениями  $F_1$ . Наиболее приемлемо представление этой волны в виде близкого к прямоугольному импульсу нормального сжатия. Такое представление вполне соответствует регистрации вариаций геоакустической эмиссии по скважинным наблюдениям на ПГП.

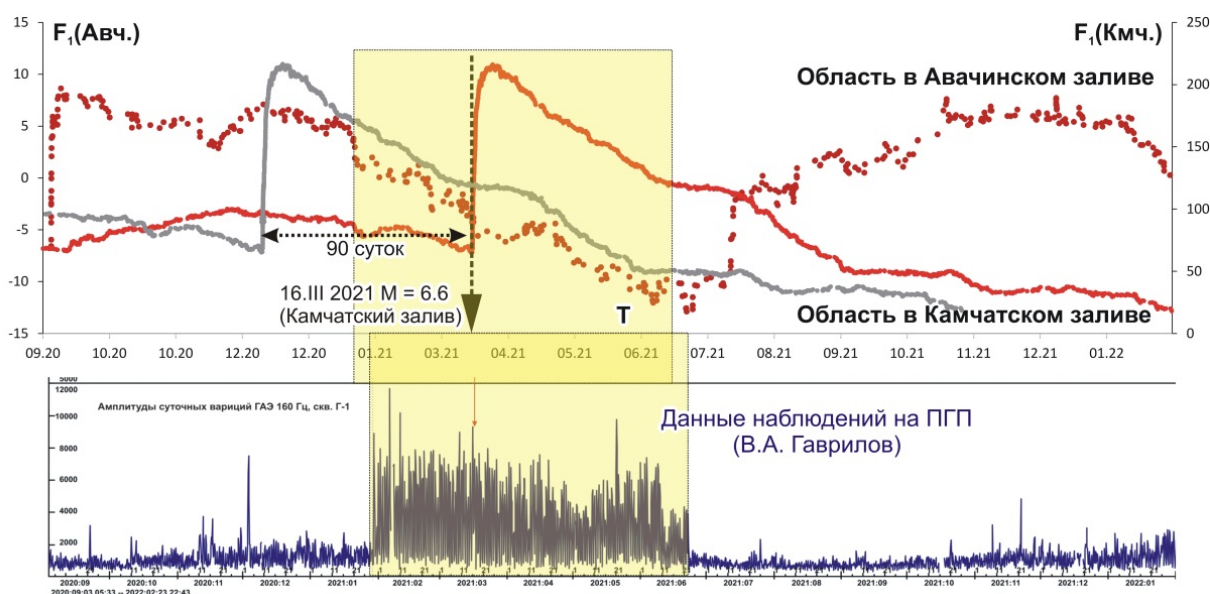


Рисунок 2 – Отражение параметром  $F_1$  прохождения импульса «нормального сжатия» от района Авачинского залива до Камчатского залива и отражение этого импульса геофизическими наблюдениями

### Краткое заключение

Хотя сделанные в работе выводы носят в большей мере гипотетический характер, несомненна перспективность развития предложенного в презентации направления исследования сеймотектонических процессов, в том числе и в плане развития метода ДССП для обеспечения сейсмобезопасности в Курило-Камчатском регионе.

*В работе использованы материалы каталогов КФ ФИЦ ЕГС РАН и другие электронные ресурсы, расположенные в свободном доступе и касающиеся сейсмологической и картографической информации. Автор также выражает благодарность д.ф.-м.н. В.А. Гаврилову за предоставленные материалы геофизических наблюдений и в.н.с. ИФЗ РАН А.В. Децеровскому – за критическое обсуждение изложенных материалов.*

1. Киссин И.Г. Основные особенности флюидного режима при развитии очагов землетрясений / И.Г. Киссин // ДАН, 2016. Т. 469. № 1. С. 91–96.

2. Соломатин А.В. Исследование связи вулканической активности и сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона / А.В. Соломатин // Вулканонология и сейсмология. 2014. № 1. С. 61–76.

3. *Соломатин А.В.* Энергетический спектр сейсмического процесса в приложении к долгосрочному сейсмическому прогнозу и среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности / *А.В. Соломатин* // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 67–79.

4. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с  $M = 7.7$ ,  $7.7$  и  $8.3$  / *С.А. Федотов, А.В. Соломатин* // Вулканология и сейсмология. 2015. № 2. С. 3–19.

5. *Aki K.* Maximum Likelihood Estimate of  $b$  in the Formula  $\lg N = a - bM$  and Its Confidence Limits / *K. Aki* // Bull. Earthq. Res. Ins. 1965. Vol. 43. P. 237–239.

6. *Kiryukhin A.V.* Geomechanical Interpretation of the Local Seismicity Related to Eruptions and Renewed Activity on Tolbachik, Koryakskii, and Avacha Volcanoes, Kamchatka, in 2008–2012 / *A.V. Kiryukhin, S.A. Fedotov, P.A. Kiryukhin* // Journal of Volcanology and Seismology. 2016. 10(5). P. 275–291.

## РАЗДЕЛ IV. МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

### CHAPTER IV. IGNEOUS SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

УДК 550.34+551.21

#### Сейсмотомографические изображения магматических и геотермальных источников под активными вулканами

И.Ю. Кулаков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия  
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
KoulakovIY@ipgg.sbras.ru*

Вулканизм в зонах субдукции связан со сложными механическими, химическими и термальными процессами в земной коре и мантии. Для их системного изучения необходимо привлекать междисциплинарные и многомасштабные исследования. Сейсмическая томография играет ключевую роль в определении геометрии системы магматического питания на различных уровнях. Так форма слэба, которая является важным контролирующим параметром функционирования магматической дуги, определяется посредством использования глобальных сейсмологических данных в региональных томографических схемах. В докладе показан пример изучения формы слэба под Камчаткой и выявления «окна» между Курило-Камчатским и Алеутским сегментами субдукции (Кулаков и др., 2011). Процессы преобразования слэба при погружении приводят к активному выделению флюидов и плавлению материала внутри мантийного клина, что приводит к образованию глубинных магматических очагов. Этот процесс изучается посредством среднемасштабной томографической схемы с использованием данных по сейсмичности в зоне Беньоффа. В докладе приводится пример построения модели строения мантийного клина под Ключевской группой вулканов по данным международного проекта KISS (Koulakov et al., 2020). В этой работе сейсмические аномалии четко показывают места выделения флюидов из слэба, пути их подъема и места накопления мантийных магматических резервуаров. Более детальная модель коры под Ключевской группой вулканов получены на основании использования данных коровой сейсмичности. На основе этой модели удалось определить три различных механизма питания наиболее активных вулканов группы: Ключевского, Безымянного и Толбачика (Koulakov et al., 2017). Данные локальных сейсмологических сетей используются для изучения малоглубинных магматических очагов, которые непосредственно ответственны за текущую эруптивную активность вулканов. В докладе приводится несколько примеров выявления верхнекоровых магматических тел под активными вулканами Камчатки, Аляски и Алеутских островов: Безымянный (Koulakov et al., 2021), Авачинский (Bushenkova et al., 2019), Спурр (Koulakov et al., 2018) и Семисопочный (Yaroshenko et al., 2022). Во всех этих случаях магматические камеры под вулканами прослеживаются в виде аномалии с повышенными значениями отношения  $V_p/V_s$ . Настоящий обзор многомасштабных исследований магматических систем выполнен по мотивам статьи (Кулаков, 2022).

**Ключевые слова:** Сейсмическая томография, активные вулканы, magma plumbing system

#### Seismic Tomography Images of Magmatic and Geothermal Sources beneath Active Volcanoes

Ivan Koulakov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia,  
Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia  
KoulakovIY@ipgg.sbras.ru*

Volcanism in subduction zones is associated with complex mechanical, chemical, and thermal processes in the Earth's crust and mantle. Interdisciplinary and multiscale studies are required for systematic and comprehensive understanding these processes. Seismic tomography is an important tool to determine the geometry of the magma plumbing system at various levels. The shape of the slab, which is an important control parameter for the functioning of a magmatic arc, is determined by using global seismological data in regional tomographic schemes. In the talk, I present an example of studying the shape of a slab beneath Kamchatka and identifying a «window» between the Kuril-Kamchatka and Aleutian subduction segments (Koulakov et al., 2011). The processes of dehydration and melting of the slab in subduction zones lead to the active release of fluids and melts and their ascent through the mantle wedge, which leads to the formation of deep magma chambers. This process is investigated with the use of a medium-scale tomographic scheme based on the seismicity data in the Benioff zone. An example of the model covering the crust and mantle wedge beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes, which was constructed within the international project KISS, is presented in the talk (Koulakov et al., 2020). In this work, seismic anomalies clearly show where fluids are released from the slab, how they rise, and where mantle magma reservoirs accumulate. A more detailed model of the crust under the Klyuchevskoy group of volcanoes was obtained based on the use of crustal seismicity data. Based on this model, it was possible to determine three different feeding mechanisms for the most active volcanoes of the group: Klyuchevskoy, Bezymyanny, and Tolbachik (Koulakov et al., 2017). Data from local seismological networks are used to study shallow magma sources that are directly responsible for the current eruptive activity of volcanoes. The talk provides several examples of tomographic models with clear images of upper crustal magmatic reservoirs beneath active volcanoes of Kamchatka, Alaska and the Aleutian Islands, such as Bezymyanny (Koulakov et al., 2021), Avachinsky (Bushenkova et al., 2019), Mount Spurr (Koulakov et al., 2018), and Semisopochny (Yaroshenko et al., 2022). In all these cases, magma chambers under volcanoes are traced as an anomaly with high values of the  $V_p/V_s$  ratio. This review of multiscale studies of magma plumbing systems is based on the article (Koulakov, 2022).

**Keywords:** seismic tomography, active volcanoes, magma plumbing system

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ 20-17-00075.*

### Список литературы

1. Кулаков И.Ю. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии / И.Ю. Кулаков, Н.Л. Добрецов, Н.А. Бушенкова, А.В. Яковлев // Геология и геофизика. 2011. Т. 52 (6). С. 830–851.
2. Кулаков И.Ю. Сейсмическая томография вулканов Камчатки / И.Ю. Кулаков // Геология и геофизика. 2022. [https://sibran.ru/journals/issue.php?ARTICLE\\_ID=182458](https://sibran.ru/journals/issue.php?ARTICLE_ID=182458)
3. Bushenkova N. Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka / N. Bushenkova, I. Koulakov, S. Senyukov et al. // Journal of Geophysical Research, Solid Earth. 2019. 124. 9694–9713, DOI: 10.1029/2019JB017952.
4. Koulakov I. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka / I. Koulakov, I. Abkadyrov, N. AlArifi et al. // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. 122. DOI: 10.1002/2017JB014082.
5. Koulakov I. Causes of volcanic unrest at Mt. Spurr in 2004-2005 inferred from repeated tomography / I. Koulakov, S.Z. Smirnov, V. Gladkov et al. // Scientific Reports. 2018. 18-20196-T. DOI : 10.1038/s41598-018-35453-w.
6. Koulakov I. Mantle sources of magmatic activity in the Northern group of volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography / I. Koulakov, N. Shapiro, C. Sens-Shoenefelder et al. // J. Geophys. Res., Solid Earth. 2020. e2020JB020097. DOI:10.1029/2020JB020097.
7. Koulakov I. Anatomy of the Bezymianny volcano merely before an explosive eruption on 20.12.2017 / I. Koulakov, P.Yu. Plechov, R. Mania et al. // Scientific Reports. 2021. 11. 1758 DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81498-9>.
8. Yaroshenko, G. Structure of the magma plumbing system beneath Semisopochnoi Island (Aleutian Arc) inferred from seismic tomography / G. Yaroshenko, I. Koulakov, N. Al-Arifi et al. // Scientific Reports. 2022. 12. 10771. 10.1038/s41598-022-14794-7.

## Геофизические неоднородности и предполагаемая флюидная модель земной коры (район Авачинского вулкана)

В.А. Логинов<sup>1</sup>, Л.И. Гонтовая<sup>1</sup>, С.Л. Сеньюков<sup>2</sup>, И.С. Улыбышев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
smile@kscnet.ru*

<sup>2</sup>*Камчатский филиал ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
ssl@emsd.ru*

В районе Авачинского вулкана рассмотрена геофизическая модель земной коры а так же на ее основе, особенности внутрикоревой флюидонасыщенности и каналов продвижения глубинных флюидов в верхнюю часть коры. Предполагается, что напряжения, возникающие на границах контрастных электропроводящих зон, связанных с различной степенью их флюидонасыщения, служат одной из основных причин сейсмической активности под вулканом.

**Ключевые слова:** Авачинский вулкан, флюиды, электропроводность, сейсмическая скорость, геофизическая модель

## Geophysical Heterogeneity and a Supposed Fluid Model of the Earth's Crust (Avachinsky Volcano Area)

Vladislav Loginov<sup>1</sup>, Larisa Gontovaya<sup>1</sup>, Sergey Senyukov<sup>2</sup>, Ilya Ulybyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

<sup>2</sup>*Kamchatka branch of Federal Research Center of Geophysical Survey RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

In the area of Avachinsky volcano, a geophysical model of the earth's crust is considered, as well as, on its basis, the features of intracrustal fluid saturation and channels for the advancement of deep fluids into the upper part of the crust. It is assumed that stresses arising at the boundaries of contrasting electrically conductive zones associated with varying degrees of their fluid saturation serve as one of the main causes of seismic activity under the volcano.

**Keywords:** Avachinsky volcano, fluids, electrical conductivity, seismic velocity, geophysical model

Геофизическими исследованиями последних десятилетий в различных регионах установлено широкое распространение сейсмических и электрических неоднородностей в консолидированной части земной коры и их тесная связь с глубинными флюидами. Поэтому геофизические неоднородности можно рассматривать в качестве индикаторов, которые несут информацию о распределении флюидонасыщенных участков земной коры, путях поступления флюидов, взаимосвязи с активной сейсмичностью, а также магматическими очагами и их распределении в земной коре под активными вулканами; такая задача рассматривается в настоящей работе для района Авачинско-Коряжской группы вулканов, в частности вулкана Авачинский. В целом Авачинско-Коряжская группа вулканов (АКГВ) располагается в области поперечной разломной структуры, корни которой согласно данным сейсмической томографии (с учетом специфики этого метода (Бухштабер и др., 1997)) достигают глубины астеносферного (ослабленного) слоя верхней мантии; он располагается в интервале глубин 70–120 км (Nizkous et al., 2006). Вероятно, на этой глубине могут располагаться мантийные очаги питания активных вулканов, откуда магматические расплавы поступают в нижнюю кору по глубинным разломам. Такой глубинный процесс, в частности, в районе АКГВ, подтверждают данные глубинных магнито-теллурических зондирований (Мороз, 1991).



Комплексная геофизическая модель земной коры разработана на основе данных сейсмических и электромагнитных наблюдений, выполненных вдоль профилей, пересекающих вулканическую группу в районе Авачинского перевала (профиль МТЗ) (Мороз и др., 2019) и конуса Авачинского вулкана (профиль КМПВ) (Балеста и др., 1989); расстояние между профилями составляет около 3 км (рис. 1).

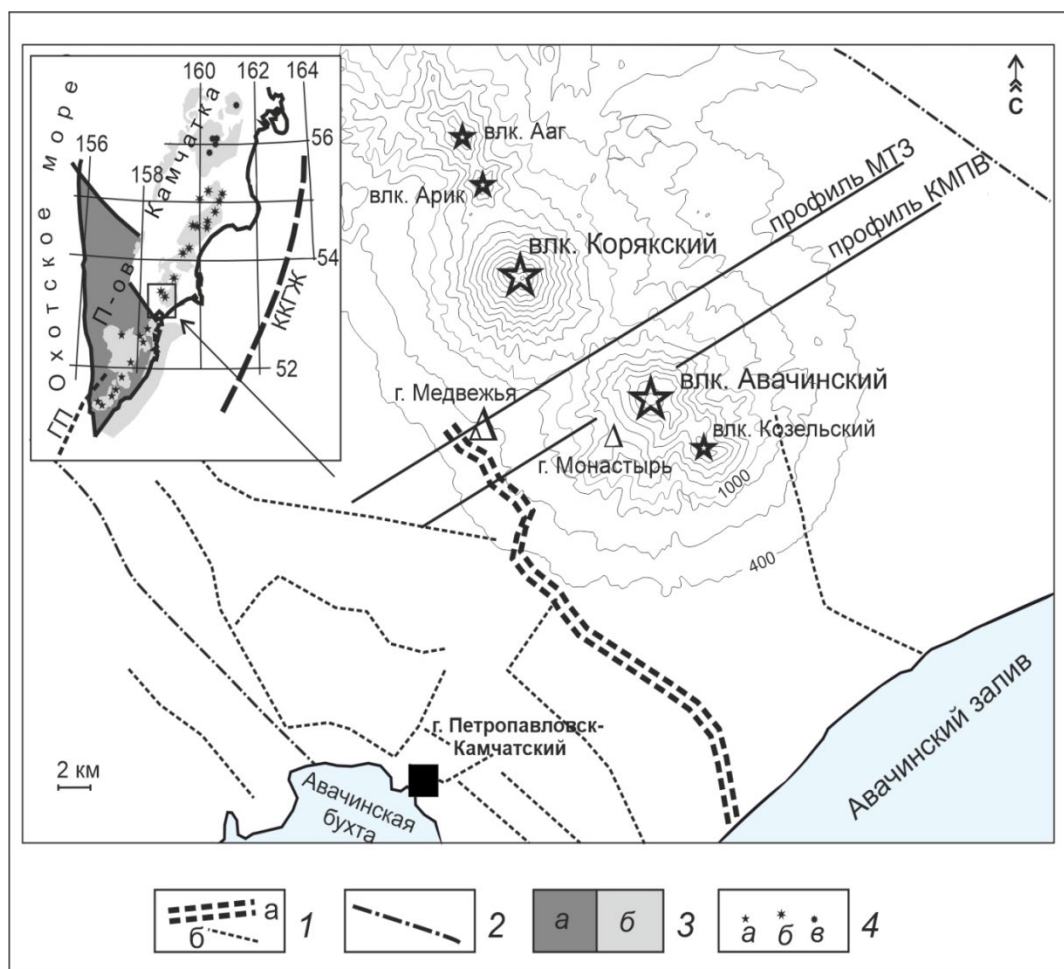


Рисунок 1 – Схема геофизических исследований методами МТЗ и КМПВ в районе Авачинско-Корякской группы вулканов. 1 – глубинный разлом (а) и другие тектонические нарушения (б) по гравиметрическим данным; 2 – глубинные разломы по геологическим данным. На врезке показаны: 3 – активизированная часть Охотоморской плиты (а) и молодые эффузивы Камчатки (б); 4 – вулканы Южно-, Восточно- и Центрально-Камчатского вулканических поясов (а, б, в, соответственно). Стрелкой показано расположение на полуострове района исследований

Модель включает сейсмические (они выделены на рисунке красным цветом) и электромагнитные неоднородности (рис. 2). Согласно сейсмическим данным, активные вулканы приурочены к относительно узкой (ее ширина около 25 км) зоне, ограниченной со стороны ЮЗ и СВ глубинными разломами, в пределах которой протекают активные сейсмические и вулканические процессы. По данным КМПВ конус вулкана приурочен к впадинам мелового (МлФ) и кристаллического (КрФ) фундаментов, а также отражающей границы (К) в средней части коры, которая, возможно, сформировалась в результате метаморфических процессов. Непосредственно под конусом выделена неоднородность, которую, вероятно, можно связывать с магматической колонной. Судя по скоростным и другим сейсмическим характеристикам, она прослеживается в разрезе верхней коры практически до глубины КрФ. На сейсмическом разрезе четко проявляется структура грабена, ограниченная с ЮЗ глубинным разломом. Судя по характеристикам сейсмического разреза верхняя часть грабена может быть насыщена метеорными водами, а нижняя – иметь связь с глубинными флюидами.

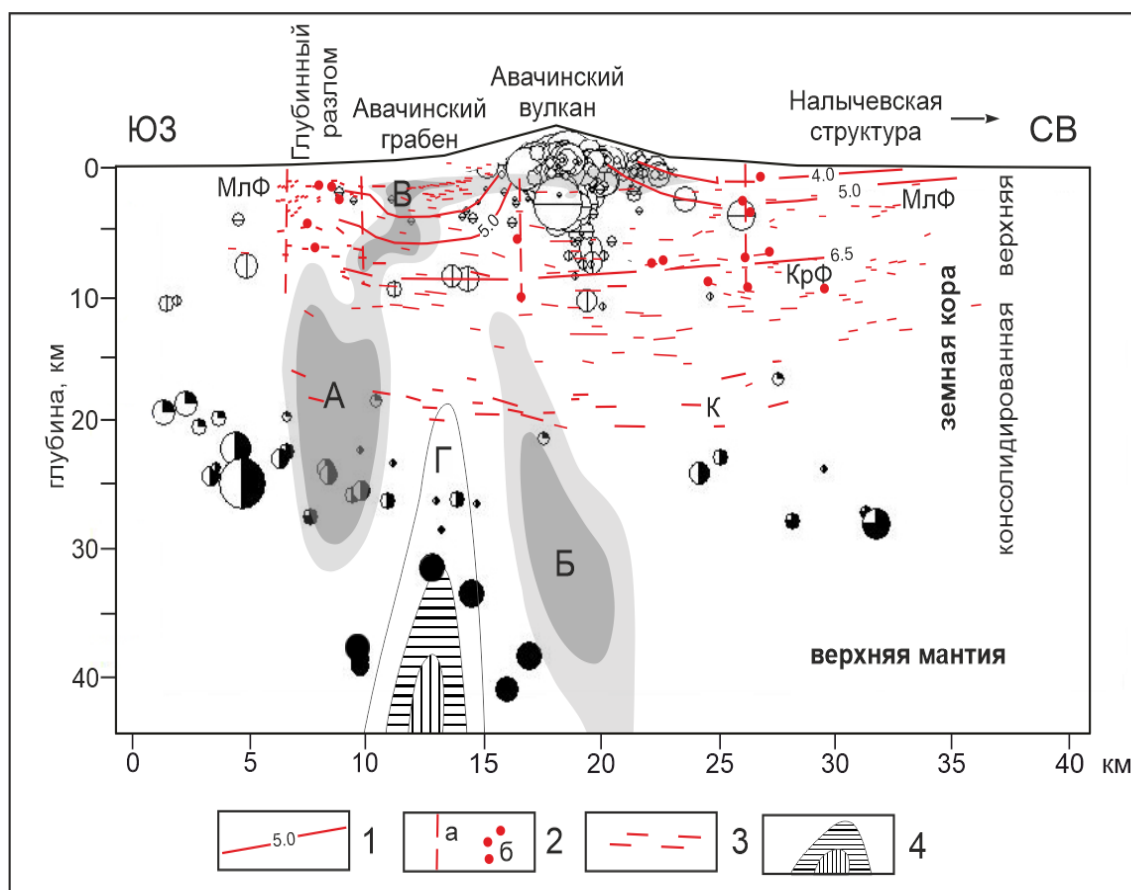


Рисунок 2 – Комплексная геофизическая модель земной коры в районе Авачинского вулкана (данные КМПВ выделены красным цветом). 1 – изолинии скорости сейсмических Р-волн (в км/с); 2 – линии предполагаемых разломов (а) и точки дифракции (б); 3 – отражающие площадки; 4 – аномалия пониженных значений электропроводности (Г); А, Б, В – области аномалий повышенных значений электропроводности

В электромагнитном поле выделяется несколько ярких неоднородностей пониженного сопротивления (А, Б, В) (рис. 2), что свидетельствует о высокой степени флюидонасыщенности в их пределах. Судя по форме аномалий А и В, они связаны с глубинным разломом, корни которого расположены в консолидированной коре, где протекают активные сейсмические процессы, выраженные серией гипоцентров землетрясений. Вероятно, имеется взаимосвязь этой глубинной аномалии со структурой грабена (аномалией В в его пределах) и одновременно, разломом, выявленным здесь по сейсмическим данным КМПВ. Возможно, сейсмическая активность в пределах разлома вызвана дополнительным воздействием поступающей в его пределы морской воды; согласно данным гравиметрии и другим, разлом протягивается вдоль подножий вулканов практически до побережья Авачинского залива (рис. 1). Таким образом, на основе комплекса геофизических данных, одновременно характеризующих сейсмические и электропроводящие свойства выявленных неоднородностей, можно предполагать, что Авачинский грабен является структурой глубинного заложения или имеет связь с консолидированной корой по системе разломов, по которым глубинные флюиды могут поступать в верхнюю кору. Возможно, именно таким образом формировались небольшие конуса типа г. Медвежьей у подножий вулканов.

Как следует из комплексной геофизической модели, гипоцентры землетрясений в большинстве своем приурочены к областям интенсивных аномалий электропроводности, располагаясь на участках их контрастных изменений. Наиболее глубокая и яркая по своей выраженности в электромагнитном поле аномалия (Б) расположена в нижней части консолидированной коры, непосредственно под конусом Авачинского вулкана; именно к ней

приурочена серия гипоцентров событий, создающих активную зону вдоль практически вертикально ориентированной аномалии неоднородности. Возможно, она протягивается глубже, в верхнюю часть литосферной мантии. Судя по интенсивности аномалии, ее значительным размерам и сейсмической активности, эту область можно связывать с глубинным магматическим очагом, вероятно, общим для Корякского и Авачинского вулканов. Можно предполагать, что в эту область поступают расплавы из магматического очага верхней мантии и здесь протекают активные процессы с выделением флюидов, которые затем поступают в верхние этажи земной коры. Активная сейсмичность, которая может сопровождать эти процессы, приводит к резкому возрастанию проницаемости коры и быстрому распространению флюидов/расплавов. В поле нижнекоровых электромагнитных аномалий, практически на границе коры с верхней мантией четко проявлена высокоомная аномалия (Г), оконтуренная гипоцентрами глубоких землетрясений повышенной интенсивности; на границе с областью предполагаемого магматического очага (Б) гипоцентры выстраиваются практически вертикально и вероятно имеют продолжение в верхней мантии. Судить о природе аномалии (Г) сложно, так как мы не наблюдаем ее возможного продолжения глубже раздела Мохо. Однако, если предполагать существование магматического очага в подкоровой мантии, то можно предположить следующее. Предполагается, что над очагами магматизма в мантии формируются зоны (ореолы) флюидно-термального воздействия с измененными физическими свойствами пород. При многократном расположении кровли очагов на нескольких фиксированных уровнях в мантии могут возникнуть слои, достаточно контрастные по отношению к вмещающей среде, чтобы быть выделенными при геофизических исследованиях [Гордиенко и др., 2003]. Возможно, что выявленная высокоомная аномалия, или ее край, может быть связана с кровлей очага. Отметим, что относительно сильные землетрясения на больших глубинах в зонах контакта блоков со значительными различиями параметров электропроводности (например Спитакское землетрясение 07.12.1988 г.) могут быть связаны с процессами дегидратации, что также может иметь связь с отмеченными особенностями глубинной сейсмичности.

Безусловно, предложенные в данной работе предположения и выводы не бесспорны и, конечно, требуют выполнения более детальных комплексных геофизических исследований.

### **Список литературы**

1. *Балеста С.Т.* Возможности сейсмического метода при изучении зон питания современных вулканов / *С.Т. Балеста и др.* // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 42–53.
2. *Бухштабер В.М.* Проблемы построения томографических изображений / *В.М. Бухштабер, А.В. Николаев* // Проблемы томографии. М.: Наука, 1997. С. 325–329.
3. *Гордиенко В.В.* Глубинные процессы в тектоносфере Украины / *В.В. Гордиенко, О.В. Усенко.* Киев ИГФ НАНУ. 2003. 147 с.
4. *Мороз Ю.Ф.* Глубинная геоэлектрическая модель Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке / *Ю.Ф. Мороз, В.А. Логинов* // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2019. № 2(42). С. 9–24.
5. *Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки / *Ю.Ф. Мороз.* М: Наука, 1991. 181 с.
6. *Nizkous I.* Velocity properties of ocean-continent transition zone lithosphere in Kamchatka region according to seismic tomography data / *I. Nizkous et al.* // Physics of the Solid Earth. 2006. Vol. 42 (4). P. 286–296.

## **Анализ магматической активности Северной группы вулканов в 2022 году с использованием программы Frac-Digger**

М.В. Лемзиков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
lemzikov@kscnet.ru*

Северная группа вулканов Камчатки включает вулканы Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Крестовский, Ушковский и Толбачинский массив, состоящий из Острого и Плоского Толбачика. В 2022 г. в этом районе в разное время вулканы Северной группы проявляли магматическую и сейсмическую активность. Во время сейсмической активности этих вулканов были зарегистрированы локальные вулканические землетрясения. Анализ магматической активности Северной группы вулканов в 2022 году выполнен по данным каталога вулканических землетрясений с использованием программы Frac-Digger, в которой заложены критерии отбора для выделения плоско-ориентированных кластеров. Получены некоторые результаты о дайках и sillax в этом районе.

**Ключевые слова:** Северная группа, вулканические землетрясения, кластеры

## **Analysis of the magmatic activity of the Northern group volcanoes in 2022 using the program Frac-Digger**

Michail Lemzikov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

The northern group of volcanoes in Kamchatka includes the Shiveluch, Klyuchevskoy, Bezmyanny, Krestovskiy, Ushkovskiy, and Tolbachinskiy massifs, which consist of Ostroy and Ploskiy Tolbachik. In 2022, the volcanoes of the Northern Group showed magmatic and seismic activity in this area at different times. During the seismic activity of these volcanoes, local volcanic earthquakes have been recorded. An analysis of the magmatic activity of the Northern Group of Volcanoes in 2022 was carried out according to the catalog of volcanic earthquakes using the Frac-Digger program, which contains selection criteria for identifying plane-oriented clusters. Some results about dikes and sills in this area are obtained.

**Keywords:** Klyuchevskoy, volcanic earthquakes, clusters

### **Введение**

На полуострове Камчатка находится Северная группа вулканов. В состав Северной группы вулканов Камчатки входят: вулкан Шивелуч, вулкан Ключевской, вулкан Безымянный, вулкан Крестовский, вулкан Ушковский и Толбачинский включающий Острый и Плоский Толбачики. Вулканы этой группы характеризуются высокой интенсивностью эруптивной, магматической и сейсмической активности. Эта группа вулканов расположена в северной части Центральной Камчатской депрессии полуострова Камчатки. Самым северным вулканом в этой группе является вулкан Шивелуч. Его высота 3223 м. Вулкан состоит из древней кальдеры и молодого активного конуса. В средней части близко расположены вулканы Ключевской, Безымянный, Крестовский и Ушковский. Вулкан Ключевской представляет собой стратовулкан. Его высота 4750 м, и он является самым активным и самым высоким базальтовым вулканом Евразии. Вулкан Безымянный его высота 2882 м. Вулкан Крестовский является потухшим вулканом. В южной части расположен Толбачинский массив, включающий Острый и Плоский Толбачики (Хренов и др., 1991).

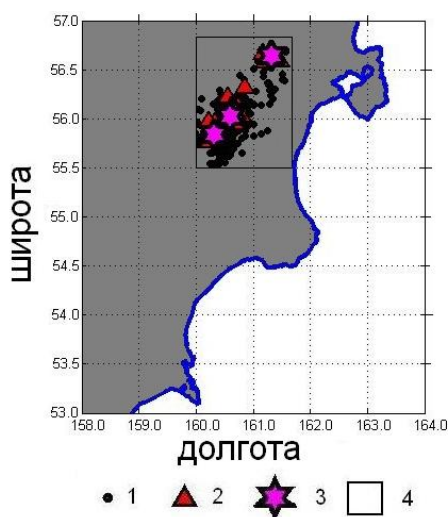


Рисунок 1 - Карта района исследования.  
 1 – эпицентры вулканических землетрясений вулканов Северной группы;  
 2 – радиотелеметрические станции;  
 3 – вершины вулканов;  
 4 – район выборки

В течение 2022 года вулканы Северной группы проявляли различную вулканическую и сейсмическую активность. Сейсмическая активность вулканов Северной группы отражена в каталогах вулканических землетрясений. При трещинных извержениях в их радиальных зонах шлаковых конусов образуются новые магматические каналы, питающие эти извержения. Такие питающие магматические каналы, которые образуются перед началом извержений и во время их развития, имеют форму даек, силлов, лакколитов и штоков. Изучение образования, строения и свойств таких тел является важными задачами вулканологии, теории формирования геотермальных, нефтяных, газовых и рудных месторождений. Целью данной работы является анализ магматической питающей системы Северной группы вулканов по сейсмическим данным и оценка геометрии плоско-ориентированных питающих магматических каналов вулканов (даек и силлов).

### Исходные данные

Для регистрации локальных вулканических землетрясений в районе Северной группы вулканов (Токарев, 1981) используется Ключевская сеть радиотелеметрических сейсмических станций Камчатского Филиала Федерального Исследовательского Центра Единой Геофизической Службы (КФ ФИЦ ЕГС РАН), которая состоит из 12 станций. Исходными данными для анализа магматической питающей системы вулканов Северной группы является каталог вулканических землетрясений за 2022 год, выбранный из общего набора сейсмических данных. Каталог выбирался по следующим критериям: диапазон широты 55,50 с.ш. – 56,80 с.ш.; диапазон долготы 160,00 в.д. – 161,50 в.д.; диапазон энергетического класса (Федотов, 1975) 1,5 – 11,3 (рис. 1). Каталог вулканических землетрясений Северной группы за 2022 год содержит данные с 1 января по 1 августа 2022 года.

### Метод

С использованием программы Java SE Development (jdk-8u40-windows-x64) (Кирюхин и др. 2016, 2018) из каталога локальных вулканических землетрясений Северной группы вулканов за 2022 год (Chebrova et. all 2020) были выделены несколько плоско-ориентированных кластеров. Критериями сравнения для включения нового объекта в кластер были выбраны: 1) близость по времени ( $\Delta t = 1$  сутки); 2) близость по расстоянию в горизонтальной плоскости ( $\Delta R < 6$  км); 3) Близость к плоской ориентации (расстояние от объекта до плоскости  $\Delta Z$  не более 200 м). Далее анализировались только кластеры с числом элементов более  $N > 5$ .

### Результаты

Результаты кластеризации вулканических землетрясений Северной группы вулканов в виде плоско-ориентированных кластеров в горизонтальной проекции на топографической карте и в вертикальной проекции с нанесением их на разрезы по данным каталога вулканических землетрясений за 2022 год, представлены на рис. 2. В 2022 году вулканическую и сейсмическую деятельность проявили вулканы Безымянный и Шивелуч. Сейсмическая активность вулкана Безымянный начала проявляться в январе 2022 года.

С 4-го января на вулкане начали регистрироваться события в конусе вулкана. В марте 2022 года значительно увеличилось количество событий и энергетический класс регистрируемых событий. По данным лаборатории ЛИСВА (лаборатории исследования сейсмической и вулканической активности КФ ФИЦ ЕГС РАН) вулкану Безымянный был присвоен оранжевый код активности. 15 марта 2022 года вулкану был присвоен красный код активности.

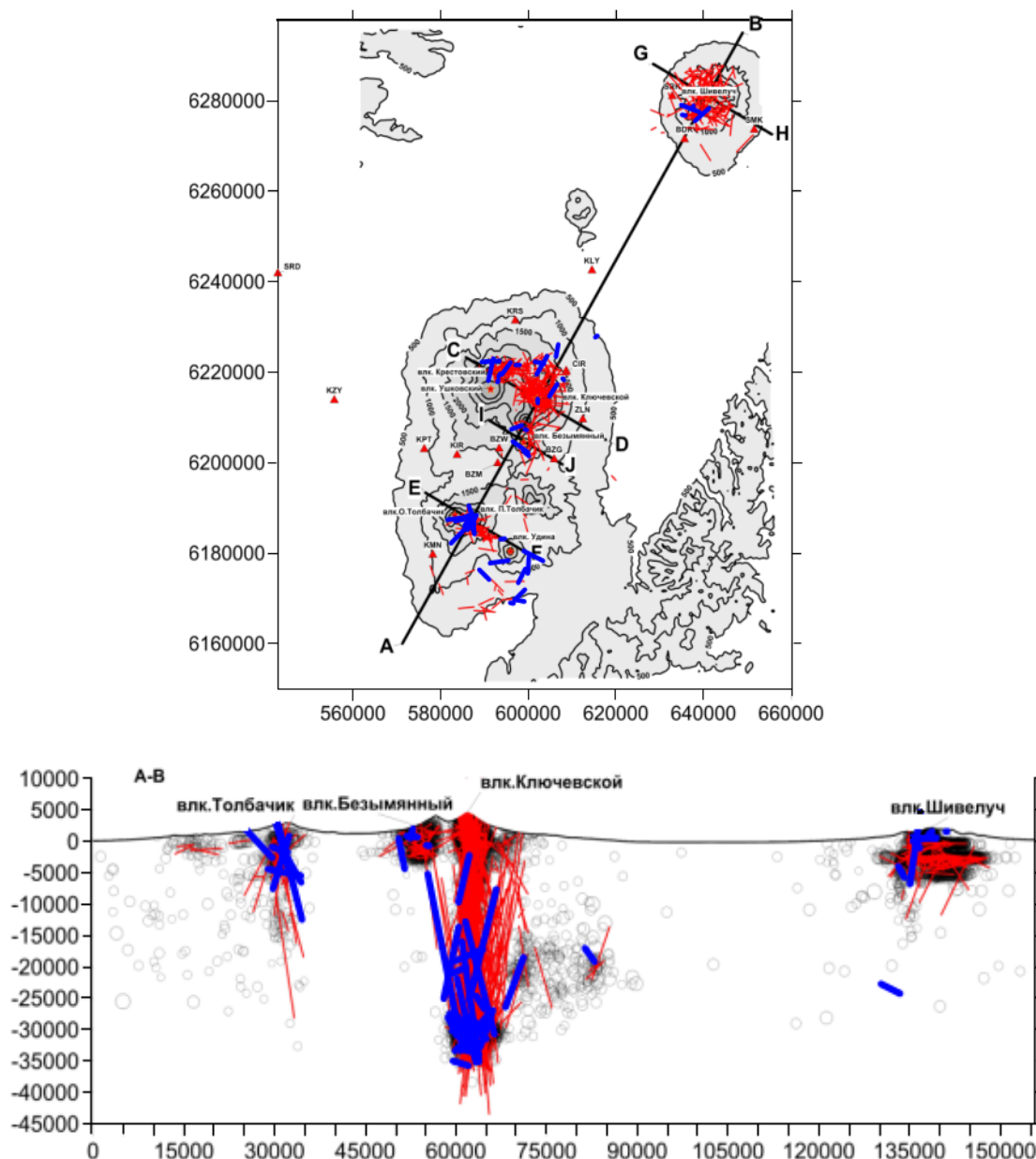


Рисунок 2 – Кластеризация вулканических землетрясений Северной группы вулканов

Сейсмическая деятельность вулкана Безымянный в период подготовки к извержению представлена в виде плоско-ориентированных кластеров различного направления, которые интерпретируются как зоны внедрения даек, по ним происходит инжекция магмы из глубинного корового очага Ключевского вулкана. Затем сейсмическая и вулканическая активность вулкана Безымянный снизилась. В середине мая 2022 года под вулканом Безымянный, вновь начали регистрироваться сейсмические события. По данным лаборатории ЛИСВА вулкану Безымянный был присвоен оранжевый код активности. 28 мая 2022 года на вулкане Безымянный наблюдалось мощная парогазовая деятельность. По данным лаборатории ЛИСВА вулкану был присвоен красный код активности. В начале июля 2022 года сейсмическая и вулканическая активность вулкана Безымянный начала снижаться.

В 2022 году вулкану Ключевской по данным лаборатории ЛИСВА был присвоен зеленый код активности (вулкан в течение 2022 года был спокоен). Плоско-ориентированные кластеры в виде даек различного направления под вулканом располагались в большом количестве на глубине от 35 до 40 км.

В начале июля 2022 года началась сейсмическая и вулканическая активность вулкана Шивелуч. В конусе вулкана начали регистрироваться события в значительном количестве. По данным лаборатории ЛИСВА вулкану был присвоен оранжевый код активности. Плоско-

ориентированные кластеры в период подготовки к извержения и во время извержения представлены в виде горизонтальных силлов, которые располагаются в основном в конусе вулкана.

Вулкан Толбачик в течение 2022 года был спокоен. По данным лаборатории ЛИСВА вулкану был присвоен зеленый код активности. Магматическая деятельность вулкана Толбачик представлена в виде плоско-ориентированных кластеров под вулканом. В целом по результатам кластеризация вулканических землетрясений по данным каталога вулканических землетрясений Северной группы за 2022 год, можно увидеть, что плоско-ориентированные кластеры расположены больше всего под вулканом Ключевской в виде даек на глубине 35–40 км в виде даек в конусе вулкана Безымянный в периоды его извержения и в конусе вулканом Шивелуч в виде горизонтальных силлов в период его сейсмической и вулканической деятельности.

### **Выводы**

Анализ магматической деятельности Северной группы вулкана в 2022 году с использованием программы Frac-Digger показал, что у вулканов Безымянный и Ключевской существует одна питающая система. Вулкан Безымянный в 2022 году проявил два периода сейсмической и вулканической деятельности, один из которых был значительным второй менее активным. Внедрение магмы в периферический магматический очаг вулкана Безымянный в периоды подготовки к извержению происходило по дайкам различного направления из нижнего корового магматического очага вулкана Ключевской. Вулкан Ключевской был в течение 2022 года спокоен, поэтому плоско-ориентированные кластеры расположены под вулканом на глубине от 35 до 40 км. В конусе вулкана Шивелуч в период его вулканической и сейсмической деятельности получено значительное количество плоско-ориентированных кластеров в виде горизонтальных силлов и даек.

*Работа выполнена по проекту № 0282-2018-0017.*

### **Список литературы**

1. Действующие вулканы Камчатки: В 2-х т. /ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука. 1991.
2. Кирюхин А.В. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг./ А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 1–8.
3. Кирюхин А.В. Магматические системы и условия глубинной гидротермальной циркуляции Ключевской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и термогидродинамического моделирования / А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А.Кирюхин // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 3–14.
4. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки / П.И. Токарев. М.: Наука, 1981. 164 с.
5. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд / С.А. Федотов. М.: Наука, 1972. 116 с.
6. Chebrova A.Yu. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions / A.Yu Chebrova., A.S. Chemarev, E.A Matveenko., D.V. Chebrov // Geophysical Research. 2020. V.21. №3. P.66-91. DOI: doi.org/10.21455/gr2020.3-5

## **Дайковое поле на южном склоне Корякского вулкана, как аналог активной магматической деятельности**

**Е.В. Черных, М.Ю. Пузанков, А.В. Кирюхин**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
jenia.chev@yandex.ru*

На южном склоне Корякского вулкана проведены работы по картированию и опробованию дайкового поля, предположительно ранней постройки с предполагаемым временем формирования в  $149.9 \pm 82.2$  тыс. лет назад (Пузанков, 2021). Также был проведен анализ и сопоставление результатов картирования с пространственным распределением даек по результатам сейсмической активности вулкана в период с 2000 г. по август 2022 г.

**Ключевые слова:** дайки, силлы, сейсмическая активность, картирование, вулкан

## **The Dyke Field on the Southern Slope of the Koryaksky volcano, as an Analogue of Active Magmatic activity**

**Evgenia Chernykh, Mikhail Puzankov, Alexey Kiryukhin**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

On the southern slope of the Koryaksky volcano, work was carried out to map and test the dyke field, presumably of early construction with an estimated formation time of  $149.9 \pm 82.2$  thousand years ago (Puzankov, 2021). Analysis and comparison of mapping results with the spatial distribution of dikes based on the results of seismic activity of the volcano from 2000 to August 2022 was also carried out.

**Keywords:** dykes, sills, seismic activity, mapping, volcano

Вулкан Корякский представляет собой стратовулкан высотой 3456 м. абс., один из крупных действующих вулканов Камчатки. Расположен в непосредственной близости (около 30 км) от городов – Петропавловска-Камчатского и Елизово и является одним из эталонных объектов для постоянного мониторинга.

За период наблюдений с XX по XXI вв. извержения вулкана Корякский происходили 3 раза:

1. декабрь 1926 г. (слабое фреатическое извержение (Мелекесцев, 1996));
2. декабрь 1956 г. – март 1957 г. (эксплозивное извержение с образованием новой трещины на северо-западном склоне вулкана на высоте 2700–2800 м. абс. (Гущенко, 1959));
3. конец декабря 2008 г. – август 2009 г. (пепло-газовое с неравномерной разгрузкой (Гордеев, Дроздин, 2010).) Промежуточная стадия между извержениями характеризуется слабой, временами исчезающей фумарольной активностью.

Вулкан Корякский состоит из Корякского-1 (ранняя постройка, предполагаемое время формирования в  $149.9 \pm 82.2$  тыс. лет), относительно эродированный со множеством даек, со вскрытой жерловиной сильно отличающейся от второй постройки (Корякский-2) возрастом  $Q_3^4 - Q_4$  (Пузанков, 2021). Склоны вулкана расчленены глубокими баранкосами.

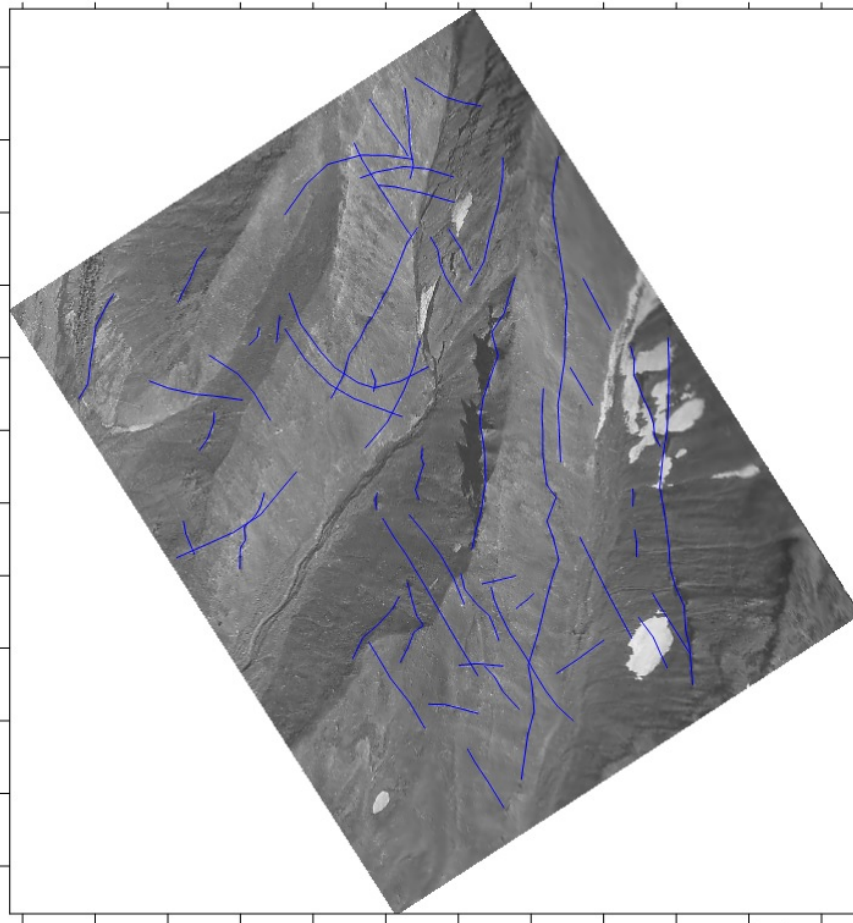
В 2020 г. проводились полевые работы в районе южного склона Корякского вулкана с целью картирования и опробования даек (см. рис. 1). Мощности этих даек варьируют от 2–3 м до 6–7 м. Вмещающими породами даек являются базальты с плагиоклаз-оливин-авгитовым набором вкрапленников и двупираксеновые андезибазальты, завершающие становление ранней постройки. В центральной части даек обнаруживаются массивные, пористые базальты, которые ближе к контакту переходят в оплавленную хрупкую шлаковую корку мощностью до 0,3 м. (Пузанков и др. 2021).





*Рисунок 1 – Дайки базальтов и андезибазальтов Корякского вулкана*

Для картирования дайкового поля на южном склоне Корякского вулкана, была осуществлена привязка аэрофотоснимка и произведена оцифровка даек с помощью ПО Didger. В результате чего было выявлено 53 дайки на общей площади  $1,8 \times 2,1$  км (см. рис. 2).



*Рисунок 2 – Результаты картирования дайкового поля на ЮЗ склоне Корякского вулкана  
Синим цветом нанесены оцифрованные дайки. Разметка осей 200 м*

На рис. 3 изображены роза-диаграмма и гистограмма распределения даек по азимуту простираения на южном склоне вулкана. Из них следует, что подавляющее число даек имеет простираение с азимутом от  $320^\circ$  до  $330^\circ$ .

Наблюдение и регистрация сейсмической активности Корякского вулкана производится с 2000 г. по настоящее время, 7-ю сейсмическими станциями (Арик, Авача, Коряка, Корякский ретранслятор, Седловина, Сомма, Угловая). (Чебров и др. 2013). За указанный период зарегистрировано 4352 землетрясений в районе Корякского вулкана.

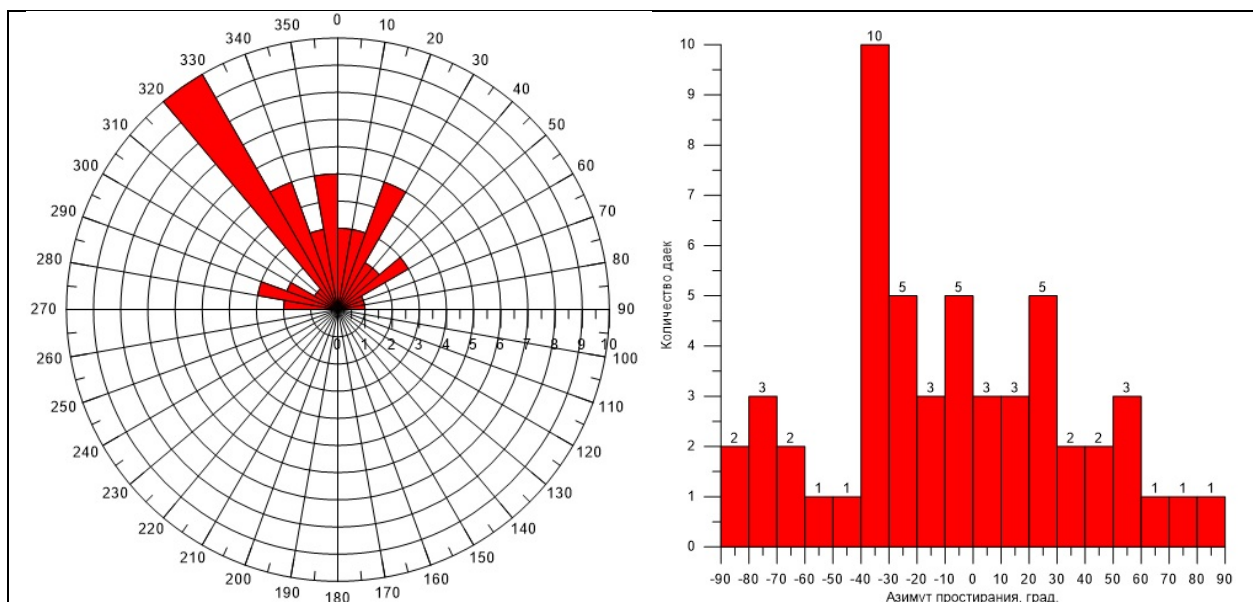


Рисунок 3 – Роза-диаграмма и гистограмма распределения даек по азимуту простирания на южном склоне Корякского вулкана

Для выявления даек по сейсмическим данным использован Frac-Digger метод (Кирюхин и др., 2016, 2017, Кирюхин, 2020). В результате, по сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН за период с 2000 по август 2022 гг. выявлено 113 даек на площади  $6.5 \times 11.5$  км со следами на отметке  $-3000$  м абс. Анализ пространственного распределения даек с использованием роза-диаграммы и гистограммы (см. рис. 4) показывает, что дайки, выявленные по сейсмическим данным, имеют преимущественно субмеридиональное простирание (61% даек с азимутом простирания от  $340^\circ$  до  $20^\circ$ ).

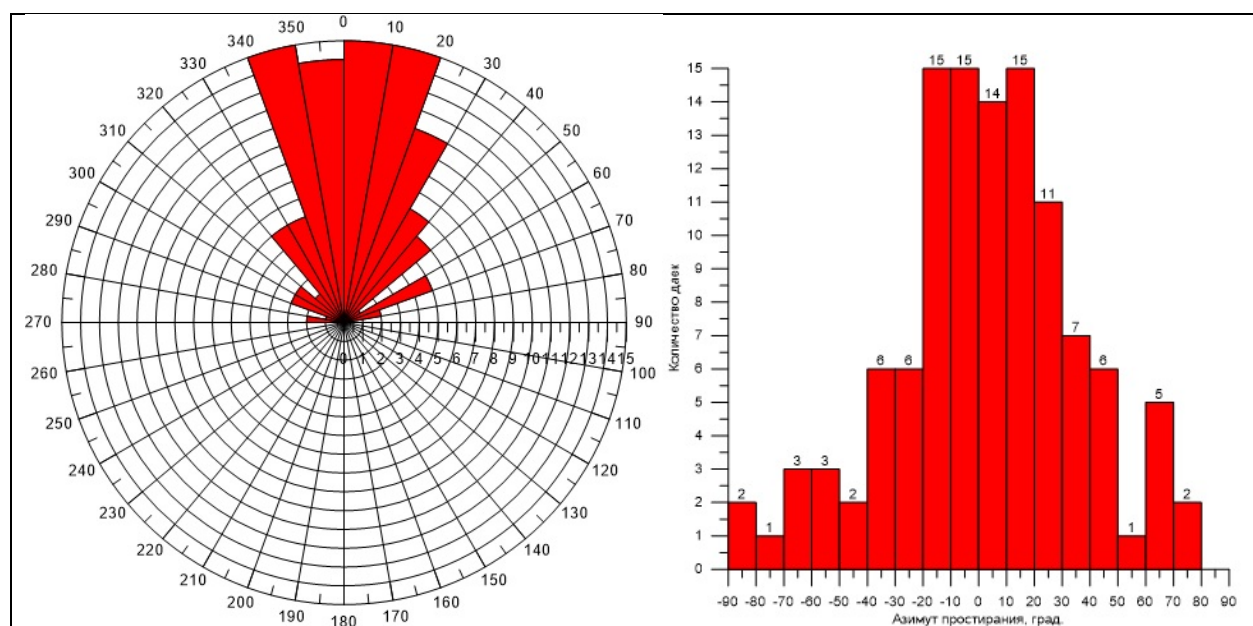


Рисунок 4 – Роза-диаграмма распределения даек по азимуту простирания, полученная в результате обработки сейсмических данных в районе Корякского вулкана на отметке  $-3000$  м абс. (с 2000 по август 2022 гг.) с использованием программы Frac-Digger

На рис. 5 показаны дайки, выявленные по сейсмическим данным (рис. 4) на отметке от  $-3000$  м абс. и дайки закартированные на южном склоне Корякского вулкана (рис. 2).

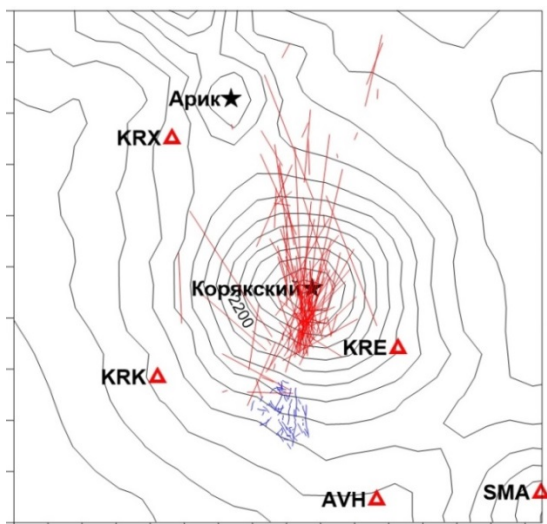


Рисунок 5 – Следы даек на отметке –3000 м абс., выявленные по сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН за период с 2000 по август 2022 гг. (показаны красным цветом), дайки закартированные на южном склоне Корякского вулкана (изображены, синим цветом).  
Разметка осей 1 км

## Выводы

1. Преобладающая ориентация простираения даек, закартированных на южном склоне Корякского вулкана, от 320° до 330°, даек выявленных по сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН на отметке –3000 м абс. за период с 2000 по август 2022 гг. от 340° до 20°.

2. Плотность даек закартированных на южном склоне Корякского вулкана составляет  $\approx 14$  даек/км<sup>2</sup> (скорость генерации 0,014 даек/км<sup>2</sup>/год, если принять время формирования дайкового поля равным 1 тыс. лет). Плотность даек выявленных по сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН на отметке –3000 м абс. за период с 2000 по август 2022 гг. составляет  $\approx 1,5$  даек/км<sup>2</sup> (скорость генерации 0,069 даек/км<sup>2</sup>/год.)

Темпы инъекции магмы, фиксирующиеся по сейсмическим данным под Корякским вулканом на отметке –3000 м абс. сопоставимы с темпами инъекций даек, закартированных на поверхности Земли в южном секторе Корякского вулкана.

*Работа выполнена по проекту № 0282-2018-0017.*

## Список литературы

1. Мелекесцев И.В. Вулкан Корякский (Камчатка): извержение 1895-1896 гг. выделено ошибочно. // И.В. Мелекесцев // Вулканология и сейсмология. 1996 №2. С.91-95
2. Гуценко И.И. Состояние Корякского вулкана в апреле – мае 1957 г. / И.И. Гуценко // Бюллетень вулканологической станции №28. М.1959 с.21-22
3. Гордеев Е.И. Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. / Е.И. Гордеев, В.А. Дроздин // Доклады Академии наук Т.430 №3, 2010. С.349-351
4. Пузанков М.Ю. Подводящие дайки системы вулкана Корякского (Камчатка) / М.Ю. Пузанков, А.В. Кирюхин, А.В. Иванов // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2021), Петропавловск-Камчатский, 6-11 сентября 2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 83-86
5. Чебров В.Н. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011г. / В.Н. Чебров, Д.В. Дроздин, Ю.А. Кугаенко и др. // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С 18-40.
6. Кирюхин А.В. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. / А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3–20.
7. Кирюхин А.В. Магматические питающие системы Корякско–Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников / А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин, Е.В. Черных // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.
8. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / А.В. Кирюхин. Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 413 с.

## РАЗДЕЛ V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ

### CHAPTER V. MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER, GEOMECHANICAL PROCESSES AND CHEMICAL INTERACTIONS IN GEOFLUID SYSTEMS

УДК 550.41

#### Экспериментальное исследование эффекта и механизма химической стимуляции на глубоком высокотемпературном граните

Бо Фэн, Чжэнпэн Цуй

*Ведущая лаборатория ресурсов подземных вод и окружающей среды, Министерство образования,  
Цзилиньский университет, г. Чанчунь, Китай  
Инженерно-исследовательский центр технологий и оборудования разработки геотермальных  
ресурсов, Министерство образования, Цзилиньский университет, г. Чанчунь, 130026, Китай  
fengbo234@126.com*

С начала 1980-х гг. для улучшения продуктивности геотермальных резервуаров всё чаще применяется химическая стимуляция, которая основывается на инъекции химически активных агентов при давлении, меньшем чем давление разрыва пласта. Улучшение проницаемости резервуара происходит посредством растворения минералов. Этот метод изначально разработан и широко используется в нефтегазовом деле. Однако, потенциал успешного применения этой технологии для высокотемпературных резервуаров, находящихся в гранитных породах, всё ещё не изучен, и одним из путей оценки этого потенциала является экспериментальное изучение геохимической реактивности, вызванной химической стимуляцией на соответствующих образцах горных пород.

**Ключевые слова:** химическая стимуляция, проницаемость резервуара, высокотемпературные граниты, растворение минералов

#### Experimental Study on Effect and Mechanism of Chemical Stimulation on Deep High-Temperature Granite

Bo Feng, Zhenpeng Cui

<sup>1</sup>*Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University,  
Changchun, China*

<sup>2</sup>*Engineering Research Center of Geothermal Resources Development Technology and Equipment, Ministry  
of Education, Jilin University, Changchun, 130026, China*

Chemical stimulation has been increasingly applied to improve the performance of geothermal reservoirs since early 1980's, which relies on the injection of chemically reactive agents at a pressure lower than the formation fracture pressure. Reservoir permeability enhancement occurs through minerals dissolution. This method originally developed for, and widely applied in, oil and gas applications (Smith and Hendrickson 1965; Economides and Nolte 1989; Schechter 1992; Liu et al. 2016). However, the potential for the successful application of this technique to high-temperature reservoirs hosted in granitic rocks is still uncertain, and one of the keys to assess this potential is to investigate experimentally the geochemical reactivity induced via chemical stimulation on relevant rock specimens.

**Keywords:** chemical stimulation, reservoir permeability, high-temperature granite, minerals dissolution

The study area is located in Matouying uplift area, in the eastern part of Hebei Province, China (Fig. 1). The Matouying uplift is a secondary structural unit in the northern margin of Huanghua depression of North China fault depression. Regional geology is characterized by the occurrence of lithologies of Archean to Quaternary age. Cenozoic formations, mainly represented by variably grain-sized sandstones and clay rocks act as the local caprock. The Matouying uplift is characterized by a heat flow larger than  $75 \text{ mW/m}^2$ , slightly higher than global average heat flow value (Wang et al. 1990), associated with a geothermal gradient generally comprised between 30 to  $50 \text{ }^\circ\text{C/km}$ , up to a maximum of about  $70 \text{ }^\circ\text{C/km}$  in the middle of the area (Shangguan et al. 2017).

The target reservoir of this study is the metamorphosed granite of Baimiao formation of the Archean Dantazi Group. The top of this granite is between 1200 to 1900 m b.g.l, whereas the bottom is generally deeper than 4000m b.g.l., which corresponds to an approximate thickness of 1500 to 2500 m. The maximum temperature is slightly above  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , which is considered appealing for geothermal applications (Qi et al. 2018). The main mineralogical constituents are K-feldspar (30%), plagioclase (33%), quartz (20%), chlorite (15%), and biotite (2%).

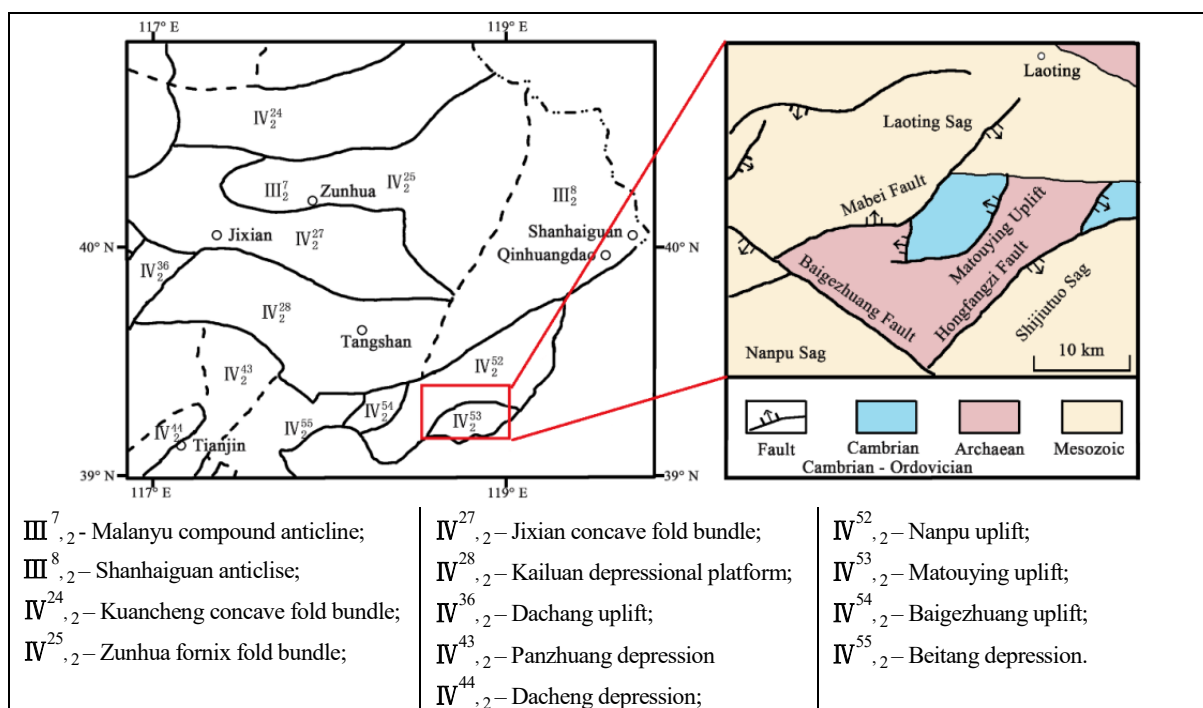


Figure 1 – Structural location of the study area

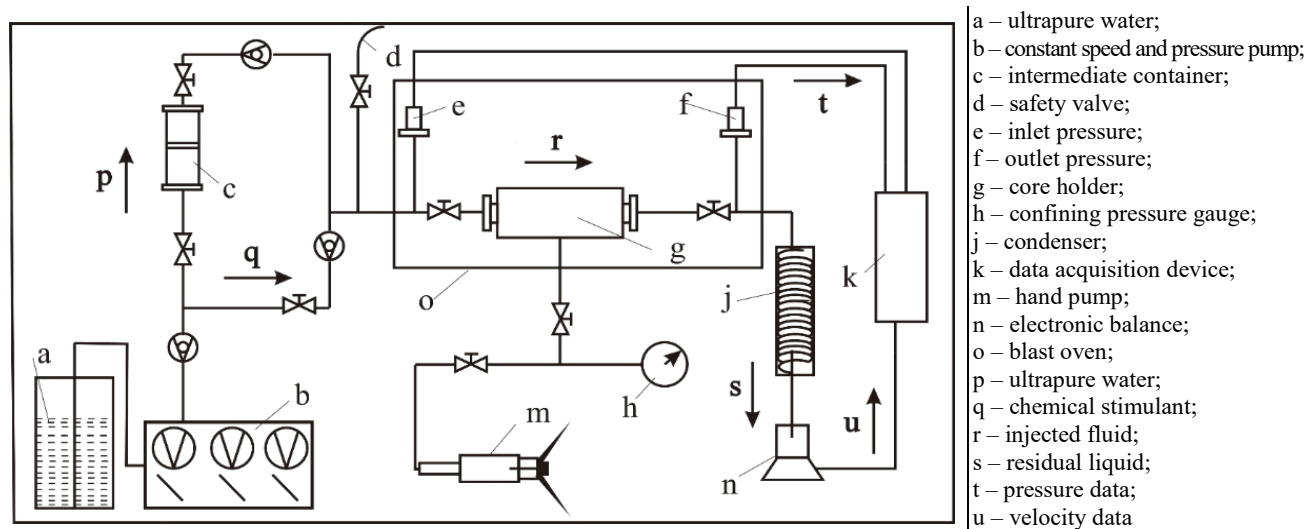


Figure 2 – Structure diagram of core flow instrument

On this premise, we combined high-temperature and high-pressure dynamic simulation (Fig. 2) and static corrosion experiments (Fig. 3) to explore the effect of different chemical stimulants on the permeability of granite samples from the Baimiao formation (Hebei Province, China).

Experimental results show that NaOH-dominated alkaline stimulants cause only weak dissolution patterns on primary feldspars and quartz, and do not sensitively affect the original amount of chlorite. The overall effect is a negligible enhancement of the original permeability of all the granite specimens analyzed. Conversely, a large increase in permeability is observed when an acid mixture of 10wt% HCl + 1.5wt% HF is used as stimulant, with an observed maximum magnifying effect of about 27 times, due to the effective dissolution of feldspar and chlorite. Though quartz appears not to be affected by dissolution, a relatively large amount of secondary neo-formed amorphous silica is also documented.

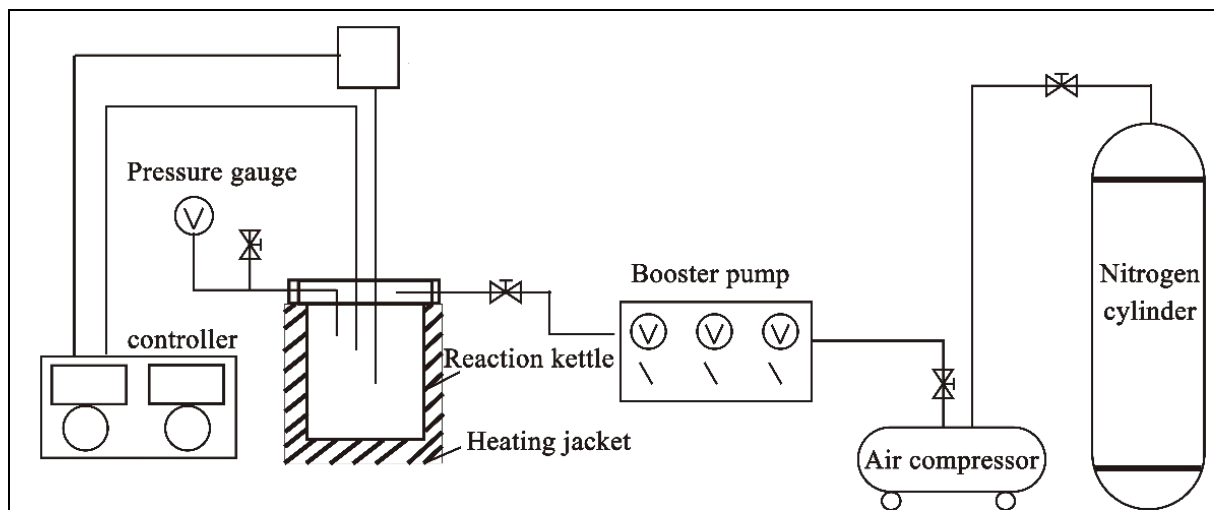


Figure 3 – Structural diagram of high temperature and high pressure reactor

## References

1. Economides MJ KG Reservoir Stimulation / MJ Economides, KG Nolte. 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NY, USA. 1989. 440 pp.
2. Liu M. (2016) Application of chemical stimulation technology in enhanced geothermal system: theory, practice and expectation / M. Liu, Y. Zhuang, C. Zhou // Journal of Earth Sciences and Environment. 2016. 38(2). P. 267–276.
3. Qi X. A brief analysis of hot and dry rock geothermal resource hosting and distribution in Hebei Province / X. Qi , G. Zhang, S. Shangguan et al. // Coal Geology of China. 2018. 30(11). P. 47–73.
4. Schechter R.S. Oil Well Stimulation / R.S. Schechter. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1992. 640 pp.
5. Shangguan S. Occurrence conditions of hot-dry-rock geothermal resources and development prospects in Matouying area / S. Shangguan // China Energy and Environmental Protection. 2017. 39(5). P. 155–165.
6. Smith C.F. Hydrofluoric acid stimulation of sandstone reservoirs / C.F. Smith, A.R. Hendrickson // Journal of Petroleum Technology. 1965. 17. P. 215–222.
7. Wang J. Basic characteristics of geothermal distribution in China / J. Wan, S. Huang, G. Huang et al. // Seismological Press, Beijing, 1990.

## **Геомеханический анализ образования трещины на образцах горных пород по коэффициенту Лодэ-Надаи**

**Н.Я. Бубнова, Р.А. Лементуева, А.А. Хромов**

*Институт физики Земли, г. Москва, Россия  
bubnovanj@gmail.com*

При изучении деформационных процессов в сейсмоактивных районах часто отмечалось, что сейсмические события происходят на стадии максимальных значений или падения напряжений в зоне возникновения землетрясения. Много лет на Камчатке проводились исследования гидротерм методом естественного электрического поля. В лабораторных условиях проводилось длительное (до суток) нагружение образцов горных пород до образования магистральной трещины. По наблюдениям за изменением главных компонент тензора деформаций  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  проанализировано образование магистральной трещины. Вычисление коэффициента Лодэ-Надаи позволило нам определить время образования магистральной трещины образцов. Наши исследования подтверждают полученные в натуральных условиях результаты, представленные в работах Гущенко.

**Ключевые слова:** напряжения, тензор деформаций, магистральная трещина

### **Geomechanical analysis of fracture formation on rock samples by Lode-Nadai coefficient**

**Natalia Bubnova, Rita Lementueva, Anton Khromov**

*Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia*

When studying deformation processes in seismically active areas, it was often noted that seismic events occur at the stage of maximum values or stress drop in the earthquake zone. For many years, hydrotherms have been studied in Kamchatka using the natural electric field method. Under laboratory conditions, long-term (up to a day) loading of rock samples was carried out before the formation of a main crack. The main crack formation is analyzed based on the observations of changes in the principal components of the strain tensor  $E_1$ ,  $E_2$ , and  $E_3$ . Calculation of the Lode-Nodai coefficient allowed us to determine the time of formation of the main crack in the samples. Our research confirms the results obtained in situ conditions and presented in Gushchenko's works.

**Keywords:** stresses, strain tensor, main crack

В связи с тем, что в результате деформирования в образце возникают зоны с различным напряженным состоянием, расчеты (Ребецкий и др. 2005) показали возможность моделирования процесса разрушения образцов в обстановке, приближенной к процессу разрушения горных пород в природных условиях. Данные о природных напряжениях сейсмогенных зон в период подготовки мегаземлетрясений (Ребецкий и др., 2005) показывают существенную крупномасштабную их неоднородность. В связи с этим одной из задач являлось изучение особенности разрушения неоднородно нагруженных образцов. Работ, посвященных комплексу тензометрических и акустических наблюдений, немного (Соболев, Пономарев, 2003; Лементуева и др., 2014, Ребецкий и др., 2005).

Особенно большой интерес представляют вариации компонент деформации на стадии предразрушения при формировании магистральной трещины.

Мы представляем результаты разрушения образца от сдвига, развивающегося в условиях неоднородного бокового сжатия-растяжения. Схема нагружения и растановки датчиков в эксперименте по длительному деформированию образца на рис 1.

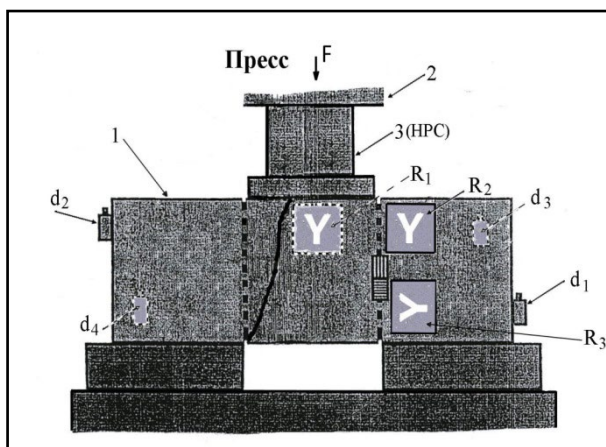


Рисунок 1 – Установка образца с обоймой между плитами прессы

Для регистрации акустических сигналов применялся акустико-эмиссионный измерительно-вычислительный комплекс Aline 32D. При наблюдениях за изменением главных деформаций  $E_1, E_2, E_3$  был выявлен характер изменений инвариантов: тензора объемной деформации и максимального сдвига.

Было установлено, что существует особенность эволюции этих главных компонент в процессе деформирования и разрушения. В более ранних работах не исследовались причины резких колебаний значений коэффициента Лоде–Надаи ( $\mu_\sigma$ ), определяющего вид тензоров деформаций в момент возникновения магистральной трещины.

Полученные в экспериментах максимальные сдвиговые деформации линейно зависят от внутреннего и внешнего давления и нелинейным образом изменяются в процессе накопления дефектов (Лементуева и др., 2014).

Объемная деформация определялась по формуле:

$$\theta = E_1 + E_2 + E_3 / 3 \quad (1)$$

Величина максимальной сдвиговой деформации соответствовала

$$\gamma = (E_1 - E_3) / 2 \quad (2)$$

В качестве критерия также был использован коэффициент Лоде–Надаи, позволяющий с большой степенью достоверности оценить схему деформации:

$$\mu_\sigma = 2(E_2 - E_3) / (E_1 - E_3) - 1 \quad (3)$$

Полученные в экспериментах максимальные сдвиговые деформации линейно зависят от внутреннего и внешнего давления и нелинейным образом изменяются в процессе накопления дефектов (Лементуева и др., 2014).

В результате анализа полученных в экспериментах материалов и расчета главных деформаций  $E_1, E_2, E_3$  построены графики, где можно наблюдать взаимосвязь компонент  $\theta$  и  $\gamma$ . На рис. 2 представлена взаимосвязь  $\theta$  и  $\gamma$  компонент для образца доломита. На начальном этапе нагружения наблюдался линейный ход кривой. Далее, в результате накопления дефектов под действием деформаций отмечен убыстряющийся рост сдвиговой компоненты по сравнению с объемной. Этот ускоряющийся рост сдвига происходит в процессе структуризации среды в результате накопления дефектов под нагрузкой (Лементуева и др., 2014, Ребецкий и др., 2005).

Ранее, в публикации об экспериментах по представленной методике (Лементуева и др., 2014), были рассчитаны координаты всех сильных сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных в эксперименте. Анализ акустических событий показал, что формировалась и локализовалась зона разрушения.

В упомянутой выше работе по изучению формирования зоны разрушения в образцах по указанной методике было отмечено, что в процессе деформирования возникали значительные АС (при максимальной компоненте сдвига), центры которых были расположены в пределах зоны кластеризации. Центры АС (по расчетам) оказались на расстоянии  $\sim 10$  мм. друг от друга на стадии IV. Мы полагаем, что формировалась значительная зона разрушения, предшествующая образованию магистральной трещины, которая прошла через образец за  $\sim 3$  сек. На рис. 2 отмечено стрелкой появление магистральной трещины в конце стадии «предразрушение» – IV.



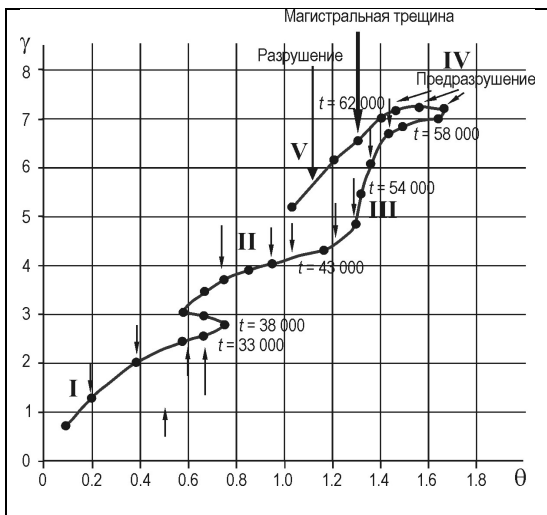


Рисунок 2 – Взаимозависимость компонент  $q$  и  $i$ ,  $t$  – время эксперимента сек.  
Римскими цифрами обозначены выявленные этапы деформирования

может оказаться достаточно для роста макротрещины даже после остановки дальнейшего нагружения образца.

Возрастание величины Лодде-Надаи после переиндексации и положительный градиент  $\mu_{\sigma}$  свидетельствуют о высокой степени деформаций в зоне наблюдений и смене напряженного состояния.

Проведенные на Камчатке полевые наблюдения методом естественного электрического поля сопоставлялись с экспериментальными результатами, полученными в лаборатории. При изучении деформационных процессов в сейсмоактивных районах часто отмечалось, что сейсмические события происходят на стадии максимальных значений или падения напряжений в зоне возникновения землетрясения (Соболев, Пономарев, 2003). Это положение хорошо проиллюстрировано на приведенном нами рис. 2. Ряд сейсмических событий происходили на подъеме коэффициента  $\mu$  после стабилизации. При этом сильным землетрясениям с магнитудой, большей 7,5, всегда предшествует стабилизация  $\mu$  перед его увеличением. Затем наблюдается стабилизация этого параметра (после переиндексации), и происходит само землетрясение.

### Список литературы

1. Лементуева Р.А. Особенности динамики формирования магистральной трещины / Р.А. Лементуева, Н.Я. Бубнова, А.В. Треусов // Физика Земли. 2014. № 1. С. 33–39.
2. Ребецкий Ю.Л. Соподчиненность микроструктурных деформаций и хрупкого микроразрушения / Ю.Л. Ребецкий, Р.А. Лементуева, Н.И. Дьяур и др. // ДАН. 2005. Т. 403. № 2. С. 253–257.
3. Соболев Г.А. Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев. М.: Наука, 2003. 200 с.

На этапе III деформации резко возрастали и зарегистрированы АС сложной формы и амплитуды. По-видимому, при формировании зоны кластеризации акустические сигналы отражают суперпозицию волн от разных воздействий (например: растяжение-сдвиг).

Рассмотрим характер изменений коэффициента Лодде-Надаи на доломите и в других экспериментах и характер изменения коэффициента  $\mu_{\sigma}$  для разных методов нагружения. Было установлено ранее, что на начальном этапе нагружения коэффициент Лодде-Надаи понижается от  $\sim 0,5$  до  $-1$  (отн. ед.). Изменение его значений в представленной работе стремится, главным образом, к предельным значениям от  $+1$  до  $-1$ . Изменение величины Лодде-Надаи после переиндексации и положительный градиент  $\mu_{\sigma}$  свидетельствуют о высокой степени деформаций в зоне наблюдений и смене напряженного состояния. В определенные моменты времени, энергии, накопленной в микроструктурах,

## **Разрывные деформации конусов выноса и перспективы поиска эндогенного тепла в зонах разломов на основе оптической и тепловизионной съемки с помощью БПЛА**

**О.В. Лунина<sup>1</sup>, А.А. Гладков<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
lounina@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей», детский технопарк  
«Кванториум Байкал», г. Иркутск, Россия*

В результате дешифрирования материалов аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения в зонах активных разломов Байкальского рифта установлено, что некоторые конусы выноса нарушены молодыми разрывами различной природы. Регистрация теплового поля в ночное время с помощью аэроплатформы DJI Matrice 210 в комплекте с инфракрасной камерой Zenmuse XT2 над такими нарушениями не позволила однозначно выявить признаки эндогенного тепла из-за ряда факторов (температура и влажность атмосферы, густота растительности и др.). Однако эти и другие наши исследования на Байкале демонстрируют, что при учете определенных закономерностей распределения температуры земной поверхности существуют перспективы развития технологии поиска источников эндогенного тепла в зонах разломов с применением тепловизионной съемки БПЛА в ночные и утренние (до восхода солнца) часы. Необходимы систематические исследования на основе полевых экспериментов в различное время года при разных погодных условиях.

**Ключевые слова:** аэрофотосъемка, разрывы, тепловизионная съемка, тепловое поле

## **Brittle deformations of fans and Earth's internal heat search prospects in fault zones based on optical and thermal imaging using UAVs**

**Oksana Lunina<sup>1</sup>, Anton Gladkov<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

*<sup>2</sup>Center for the Development of Continuing Education of Children, Ministry of Education of Irkutsk Region,  
Irkutsk, Russia*

Ultra-high resolution aerial photography in active fault zones of the Baikal Rift has shown that young discontinuities of various nature disturb some alluvial fans. Registration of the thermal field at night using the DJI Matrice 210 air platform completed with the Zenmuse XT2 infrared camera over such disturbances did not allow us to identify unambiguous signs of Earth's internal heat due to a number of factors (temperature and humidity of the atmosphere, vegetation density, etc.). However, these and our other studies on the Baikal area demonstrated that, taking into account certain regularities in the distribution of the earth's surface temperature, there is a potential for developing a technology for searching for sources of Earth's internal heat in fault zones using thermal imaging with UAVs at night and morning (before sunrise) hours. Systematic research is needed based on field experiments in different seasons and weather conditions.

**Keywords:** unmanned aerial photography, ruptures, thermal imaging, heat field

### **Введение**

В последние годы аэрофотосъемка с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) активно внедряется во многие виды геологических работ, в том числе для изучения деформаций земной поверхности (Blanton et al., 2020; Лунина и др., 2021; Martins et al., 2020; Лунина, Гладков, 2022a). В свою очередь тепловизионная съемка геологических объектов с помощью БПЛА представляет собой относительно новое направление исследований (Präg et al., 2020; Zhao et al., 2021), которое при установлении определенных закономерностей распределения теплового инфракрасного (ИК) излучения земной поверхности и методически обоснованном подходе к проведению работ может стать мощным инструментом для

обнаружения подземных источников тепла. Цель настоящей работы заключалась в поиске признаков эндогенного тепла в зонах динамического влияния разломов и возможностях его выделения на фоне других тепловых аномалий, связанных с очевидными факторами.

### **Регион работ**

Полевые эксперименты проводились в пределах Байкальского рифта, известного своей активной тектоникой, современной и палеосейсмичностью. В северной части оз. Байкал и на его восточном побережье встречаются термальные источники, расположение которых можно наглядно посмотреть на интерактивной карте (<https://baikal-ayan.ru/termalnye-istochniki-pribaikaluya>). Объектами наших исследований являлись активные разломы, в зоны которых попадают конуса выноса, выходы коренных пород, берег оз. Байкал с прилегающей акваторией, а также горячие источники Змеиный и Загза, использованные в качестве эталонных для визуализации термальных аномалий на тепловых картах.

### **Методика работ**

Исследования выполнялись с применением методов аэрофотосъемки в видимом и инфракрасном диапазонах. Оптическая съемка в разное время проводилась при помощи БПЛА DJI Phantom 4 RTK и БПЛА DJI Phantom 4 Pro V 2.0 и охватывала площади значительно большие, чем площади тепловизионной съемки. Последняя проведена с использованием аэроплатформы DJI Matrice 210 в комплекте с инфракрасной камерой Zenmuse XT2, объединяющей в одном корпусе тепловизионную (FLIR Tau 2) и оптическую камеры. Данные оптической съемки обрабатывались фотограмметрическим методом в программе «Agisoft Metashape», ИК-съемки – в программах «FlirTools» и «Pix4DMapper».

### **Результаты работ**

Прежде всего, необходимо отметить, что в местах выходов термальных вод «Загза» и «Змеиный» на высоте полета 30–70 м их температура, фиксируемая на тепловых снимках, на 10–12,5 °С ниже, чем в реальности. Полученные расхождения хорошо согласуются с наблюдениями на активных вулканах Курильских островов, где разница в показаниях тепловизора и электронного термометра достигает 10–20 °С (Козлов, Жарков, 2012). Эти факты свидетельствуют о том, что для поисковых исследований наибольшую важность имеют не фактические значения температур, а градиент температур между соседними объектами, демонстрирующий распределение тепла и разницу температур поверхностей внутри исследуемой площади.

Аэрофотосъемка в оптическом диапазоне была проведена в пределах нескольких конусов выноса на западном побережье оз. Байкал. В результате анализа ортофотопланов и цифровых моделей местности в зонах динамического влияния активных разломов на мысах Рытый, Шартлай, Голоустный и Отто-Хушун обнаружены зоны разрывных деформаций, имеющие разные проявления и генезис. Первоначальная гипотеза предполагала, что некоторые из обнаруженных разрывов в конусах выноса должны проявляться термомаксимумами, однако влияние различных побочных факторов (растительность, особенности тепловой инерции для разных природных объектов земной поверхности и др.) не позволили однозначно выделить тепловые аномалии вдоль нарушений. Так, например, на Мысе Рытом на ИК-изображении от 04.07.2020 г., 04:20 часа утра, современные разрывы, выраженные рвами и уступами, проявляются так же, как и сухие русла повышенными температурами, что объясняется особенностями распределения растительности в пониженных участках. На мысе Ото-Хушун, где съемка проводилась в 3:30–3:47 утра 27.05.2022 г. при наличии инея на траве, характер распределения температур был обратный: русла и разрывы были самые холодные, но при этом температуры вдоль нарушений были чуть выше, чем в сухих заросших протоках. Нарушения в отложениях дельты р. Голоустной, проявляющиеся 15.05.2022 г. в 19:00 контрастно в пониженных температурах по сравнению с прилегающей территорией ассоциированы с криогенными процессами, активно развивающимися на трассе Приморского разлома.

Действительные тепловые аномалии, которые привлекли наше внимание, выделились на ИК-изображениях от 18.09.2020 г. слева от р. Сарма на западном побережье оз. Байкал (Лунина, Гладков, 2022б). В районе 5:00 утра они были выражены линейными структурами длиной 3–6 метров, простирающимися параллельно Приморскому разлому на расстоянии от 40 до 88 метров от главного сместителя. Визуально местность с аномалиями ничем не отличается от окружающей площади и представлена сухой степной растительностью среди валунов. Кроме того, рядом отмечено нетипичное распределение теплового поля в районе коренного выхода гранитов. Каменистые участки были теплыми, в то время как должны были оставаться холодными ранним утром до восхода солнца. Выполненная тепловая аэрофотосъемка коренного выхода 02.10.21 г. в 4:11–4:56 и оптическая 03.10.21 г. в 9:14–10:02 показали, что ярко выраженная эманация тепла происходит по трещинам горных пород. Значения температур вдоль них составили 2,5–2,8 °С, что на 7,5–8 °С выше температуры окружающих объектов. При этом, данные значения характерны как для крупных, так и более мелких систем трещин, что свидетельствует о поступлении тепла из глубин земли.

Исследования вдоль побережья оз. Байкал показали, что состояние воды у берега, регистрируемое с применением ИК-камеры можно использовать как поисковый индикатор глубинных источников тепла. При этом выявлены типичные природные аномалии, которые связаны с известными объектами, закономерностями и явлениями. К ним относятся: участки с зеленой растительностью, которые в ночное и утреннее (до восхода солнца) время обычно (в отсутствии росы и инея) характеризуются повышенными, относительно окружающих природных объектов, температурами; зоны впадения в оз. Байкал рек, в которых температура воды отличается от температуры воды в озере, что обуславливает наличие тепловых аномалий, связанных со смешиванием водных масс разной температуры; зоны «просачивания» из-под берегового вала теплых водных потоков из природных прибрежных резервуаров воды (болота, ручьи и т.д.); аномалии, связанные с антропогенной деятельностью. Проявление других «нетипичных» термомаксимумов можно рассматривать как перспективные для дальнейшего поиска термальных источников.

### **Заключение**

Проведенные исследования показали, что при учете определенных закономерностей распределения тепла на земной поверхности существует потенциал для развития технологии поиска источников эндогенного тепла в зонах разломов с применением тепловизионной съемки квадрокоптером в ночные и утренние (до восхода солнца) часы. При этом обязательна аэрофотосъемка сверхвысокого разрешения для сопоставления тепловых карт с оптическими изображениями и исключения типичных аномалий, несвязанных с внешними факторами. Важное значение при съемках имеет время года, климат, и, соответственно, погодные условия, так как тепловая инерция разных объектов сильно зависит от температуры. Желательны повторные съемки в одних и тех же и разных условиях для одной и той же площади. Кроме того, тепловизионная съемка с помощью БПЛА может помочь в идентификации нарушений земной поверхности, которые могут быть не обнаружены на ортофотопланах и ЦММ при беглом просмотре или недостаточной детальности.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00064,  
<https://rscf.ru/project/22-27-00064/>.*

### **Список литературы**

1. Козлов Д.Н. Тепловизионная съемка активных вулканов Курильских островов в 2009–2011 гг. / Д.Н. Козлов, Р.В. Жарков // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 231–239.
2. Лунина О.В. Первые результаты тепловизионной съемки геологических объектов на Байкале с использованием квадрокоптера / О.В. Лунина, А.А. Гладков // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 1. С. 73–78.

3. Лунина О.В. Признаки крипа в зоне влияния Зундукского разлома на северо-западном побережье озера Байкал / О.В. Лунина, А.А. Гладков, И.А. Денисенко // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2021. Т. 35. С. 57–70.

4. Лунина О.В. Феномен разрывообразования в дельтовых отложениях мыса Рытый на северо-западном побережье оз. Байкал / О.В. Лунина, А.А. Гладков // Геология и геофизика. 2022а. Т. 62. № 2. С. 149–162.

5. Blanton C.M. Refining the spatial and temporal signatures of creep and co-seismic slip along the southern San Andreas Fault using very high resolution UAS imagery and SfM-derived topography, Coachella Valley, California / C.M. Blanton, T.K. Rockwell, A. Contz, J.T. Kelly // Geomorphology. 2020. Vol. 357. P. 1–21.

6. Martins B.H. Ground Surface Deformation Detection in Complex Landslide Area—Bobonaro, Timor-Leste—Using SBAS DInSAR, UAV Photogrammetry, and Field Observations / B.H. Martins, M. Suzuki, P.E. Yastika, N. Shimizu // Geosciences. 2020. Vol. 10 (6). 245.

7. Präg M. Thermal UAS survey of reactivated hot spring activity in Waiwera, New Zealand / M. Präg, I. Becker, Ch. Hilgers // Adv. Geosci. 2020. Vol. 54. P. 165–171.

8. Zhao Y. Identification of mining induced ground fissures using UAV and infrared thermal imager: Temperature variation and fissure evolution / Y. Zhao, B. Sun, S. Liu, et al. // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2021. Vol. 180. P. 45–64.

УДК 550.334

### **От закономерностей реализации деформаций льда перед ледовыми ударами к поискам предвестников тектонических землетрясений**

**С.А. Борняков<sup>1</sup>, А.А. Добрынина<sup>1</sup>, А.Н. Шагун<sup>1</sup>, В.А. Саньков<sup>1</sup>, Д.В. Салко<sup>1</sup>,  
А.И. Мирошниченко<sup>1</sup>, Г.В. Встовский<sup>2</sup>, А.Е. Синцов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
*bornyak@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных конструкций  
им. Мельникова, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ОАО «Безопасность»

По результатам инструментального мониторинга обнаружен автоволновой характер реализации деформаций льда перед ледовыми ударами. Появляясь за минуты-первые десятки минут до удара этот процесс развивается с увеличением амплитуды колебаний, нередко с кратным сокращением их периода. Автоволновая динамика деформаций ледового покрова обусловлена его способностью к самоорганизации как структурно-неоднородной среды в критическом состоянии. Наличие самоорганизации деформационного процесса подтверждается результатами обработки временных рядов деформаций ледового покрова методом анализа кривизны структурных функций (МАКСФ) и методом спектрального анализа на основе периодограммы Ломба-Скаргла.

Результаты сейсмического мониторинга показали, что автоволновые процессы характеризуются постоянными частотами 0,1 Гц.

С учетом выявленных особенностей реализации деформаций и микросейсмических колебаний льда перед ледовыми ударами выполнен анализ данных деформационного и сейсмического мониторинга на Бугульдейском геодинамическом полигоне перед Кударинским землетрясением. Результат спектрального анализа микросейсмических шумов до и после землетрясения, показал, что за 14 часов до землетрясения выявлен автоволновой процесс с колебаниями в частотном диапазоне от 0,01 до 0,1 Гц.

**Ключевые слова:** лед, деформация, автоколебания, ледовый удар, землетрясение, предвестники

## **From the regularities of the realization of ice deformations before ice strikes to the search for precursors of tectonic earthquakes**

**Sergey Bornyakov<sup>1</sup>, Anna Dobrynina<sup>1</sup>, Artem Shagun<sup>1</sup>, Vladimir Sankov<sup>1</sup>, Denis Salko<sup>1</sup>, Andrey Miroshnichenko<sup>1</sup>, Grigory Vstovsky<sup>2</sup>, A.E. Sintsov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia  
bornyak@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>*Central Research and Design Institute of Building Structures named Melnikov, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Open Joint Stock Company «Safety»*

According to the results of instrumental monitoring, the auto-wave nature of the implementation of ice deformations before ice strikes was detected. Appearing minutes and the first tens of minutes before impact, this process develops with an increase in the amplitude of oscillations, often with a multiple reduction in their period. Autowave dynamics of deformations of the ice cover is due to its ability to self-organize as a structurally heterogeneous environment in a critical state. The presence of self-organization of the deformation process is confirmed by the results of processing the time series of deformations of the ice cover by the method of analysis of curvatures of structural functions (IGSF) and the method of spectral analysis based on the Lomba-Scargla periodogram.

The results of seismic monitoring showed that autowave processes are characterized by constant frequencies of 0,1 Hz.

Taking into account the identified features of the implementation of deformations and microseismic fluctuations of ice before ice strikes, an analysis of deformation and seismic monitoring data was performed at the Buguldey geodynamic polygon before the Kudarin earthquake. According to the results of spectral analysis of microseismic noise before and after the earthquake, it was shown that 14 hours before the earthquake, an autowave process was detected with fluctuations in the frequency range from 0,01 to 0,1 Hz.

**Keywords:** ice, deformation, self-oscillation, ice impact, earthquake, harbingers

Ледовый покров оз. Байкал при медленных нагрузках проявляет реологические свойства, подобные свойствам литосферы при длительном действии на неё напряжений, что делает возможным его использование для моделирования сеймотектонических процессов (Добрецов и др., 2007). В зимний период в ледовом покрове формируются многокилометровые становые трещины, работающие в режиме «раскрытие-закрытие» при вариациях отрицательных температур воздуха. В весенний период, преимущественно в первой половине марта, при резких потеплениях в дневное время ледовый покров существенно увеличивает свой объем за счет температурного расширения, что приводит к росту в нем тангенциальных напряжений сжатия. Под действием последних контакт между ледовыми пластинами в становой трещине разрушается с последующим поддвигом одной пластины под другую. Процесс первичного формирования подвига, а также последующие активизации по механизму «stick-slip» периодически сменяющегося контакта между ледовыми пластинами сопровождаются сейсмическими эффектами, традиционно называемые «ледовыми ударами». Естественная природа ледовых ударов, подготовка и реализация которых протекают на небольших временных интервалах, измеряемых первыми часами, делает их уникальным объектом для инструментальных наблюдений, результаты которых, с учетом определенного сходства реологических свойств ледового покрова и литосферы, могут быть использованы для разработки способов средне- и краткосрочного прогноза тектонических землетрясений (Добрецов и др., 2007; Псахье и др., 2008; Ружич и др., 2009).

Авторами выполнен инструментальный мониторинг деформаций и сейсмических колебаний ледового покрова оз. Байкал в пределах становой трещины в районе п. Бугульдейка в 4 км от берега (координаты 52°31'06.27'', 106°13'06.72''). Мониторинг проводился инструментальным комплексом авторской разработки (Салко, Борняков, 2014). Деформации измерялись штанговыми датчиками с базой 2 метра с дискретностью 4 Гц. Датчики располагались перпендикулярно простиранию становой трещины на расстоянии 15

метров от неё. Сейсмические колебания регистрировались сейсмостанциями «Байкал-7HR» с датчиками «СК-1».

Важным результатом выполненного мониторинга явилось обнаружение автоволнового характера реализации деформаций льда перед ледовыми ударами. Появляясь за минуты-первые десятки минут до удара этот процесс развивается с увеличением амплитуды колебаний, нередко с кратным сокращением их периода. Непосредственно перед ударом такой упорядоченный характер колебаний сменяется хаотическим с увеличением их амплитуды и периода (рис. 1).

Автоволновая динамика деформаций ледового покрова обусловлена его способностью к самоорганизации как открытой, структурно-неоднородной системы в критическом состоянии (Хакен, 1980; Пригожин, Кондипуди, 2002). Наличие самоорганизации деформационного процесса косвенно подтверждается результатами обработки временных рядов деформаций ледового покрова методом спектрального анализа на основе периодограммы Ломба-Скаргла (Lomb, 1976; Scargle, 1982, 1989).

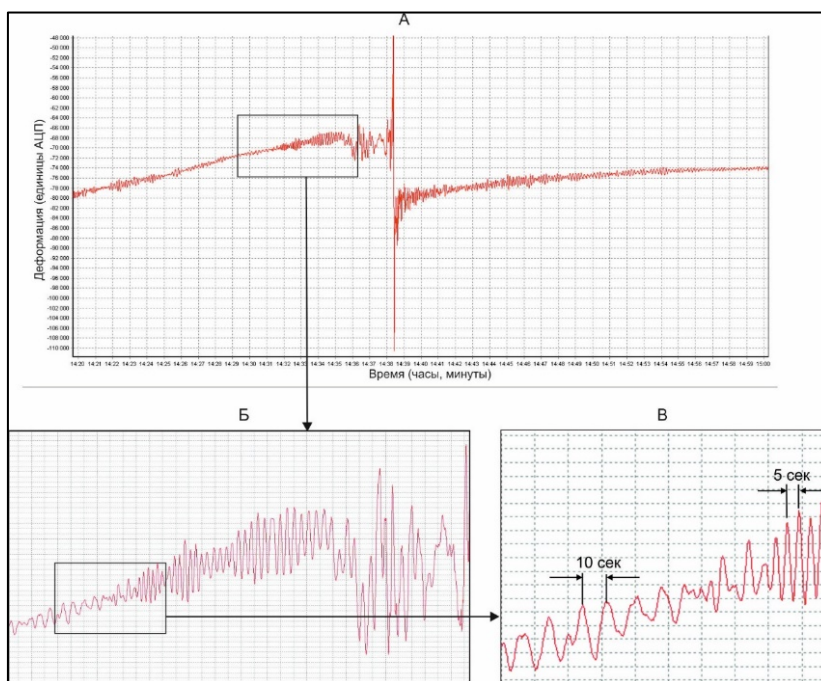


Рисунок 1 – Пример наличия автоволнового характера реализации деформационного процесса в ледовом покрове перед ледовым ударом (А) и его детали (Б,В)

На рис. 3 приведены спектрограммы временного ряда деформаций ледового покрова в период с 9 часов до 16 часов 07 марта 2021г. Весь ряд был разбит на часовые интервалы: 9–10 ч; 10–11 ч; 11–12 ч; 12–13 ч; 13–14 ч; 14–15 ч и 15–16 ч. Временным интервалам, в пределах которых имела место самоорганизация, соответствуют упорядоченные спектрограммы, отражающие коррелированный характер колебаний в деформационном процессе (рис. 3 Г, Д, Е). Вне этих интервалов спектрограммы имеют хаотический характер (рис. 3 А, Б, В, Ё).

По результатам спектрального анализа данных сейсмического мониторинга установлено, что предвещающие ледовый удар колебания имеют большую амплитуду и частоту 0,1 Гц.

С учетом выявленных особенностей реализации деформаций и микросейсмических колебаний льда перед ледовыми ударами выполнен спектральный анализ данных деформационного и сейсмического мониторинга на геодинимическом полигоне Бугульдейка перед Кударинским землетрясением 09.12.2020г ( $M_w = 5,5$ ). Полигон расположен напротив его эпицентра на Западном берегу Байкала рядом с одноименным поселком (координаты: 52.567 °с.ш., 106.136 °в.д.).

Для спектрального анализа данных деформационного мониторинга временной ряд был разбит на следующие интервалы: 1–30 июня; 1–31 июля, 1–31 августа; 1–20 сентября – 22–30 сентября – 1–30 октября (рис. 4). Приведенные спектрограммы показывают, что

структура и интенсивность осцилляций меняется во времени что наиболее отчетливо проявлено на периодах в интервале их значений от Е5 до Е6. На первой спектрограмме в этом интервале насчитывается четыре основных периода со значениями параметра «периодограмма» более 1000 (рис. 4 А). В следующий временной интервал количество основных периодов увеличивается до пяти, за счет появления дополнительного периода 1.6Е6. При этом значения параметра «периодограмма» возрастают в два раза на фоне усиления хаотизации спектрограммы (рис. 4 Б). В третий интервал количество основных периодов осцилляций со значениями параметра «периодограмма» более 1000 увеличивается до восьми, а структуре спектрограммы проявляется упорядоченность (рис. 4 В), аналогичная выше представленной на рис. 3 Г и 3 Д. В последующий, предсейсмогенный интервал эта упорядоченность сохраняется на фоне увеличения параметра «периодограмма» более чем в два раза (рис. 4 Г). После землетрясения структура спектра перестраивается. В последнюю декаду сентября значимой остается только большепериодная осцилляция 4Е5 (рис. 4 Д). В последующий расчетный период происходит существенное снижение параметра «периодограмма», а спектрограмма имеет неупорядоченную структуру с преобладанием веса малопериодных осцилляций (рис. 4 Е).

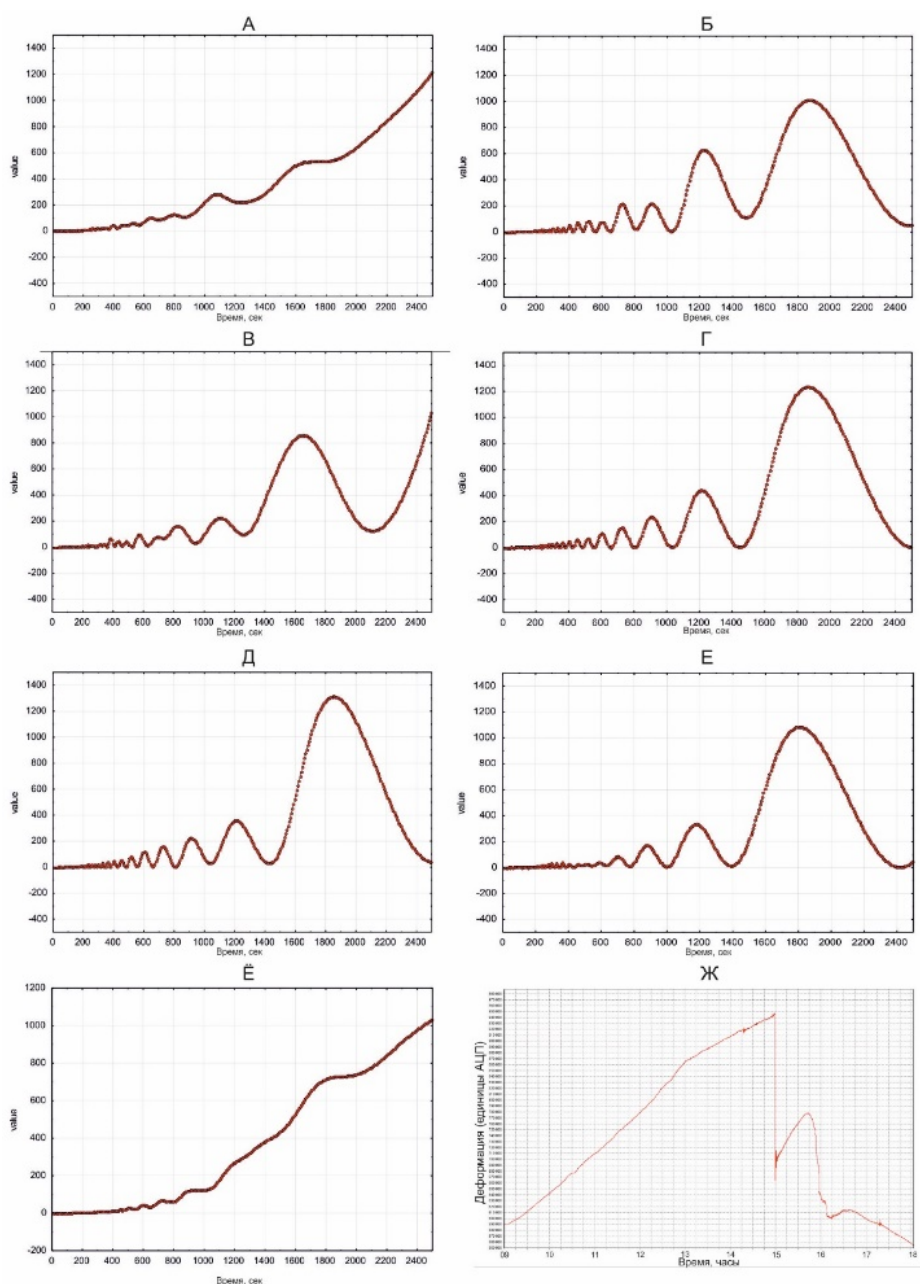
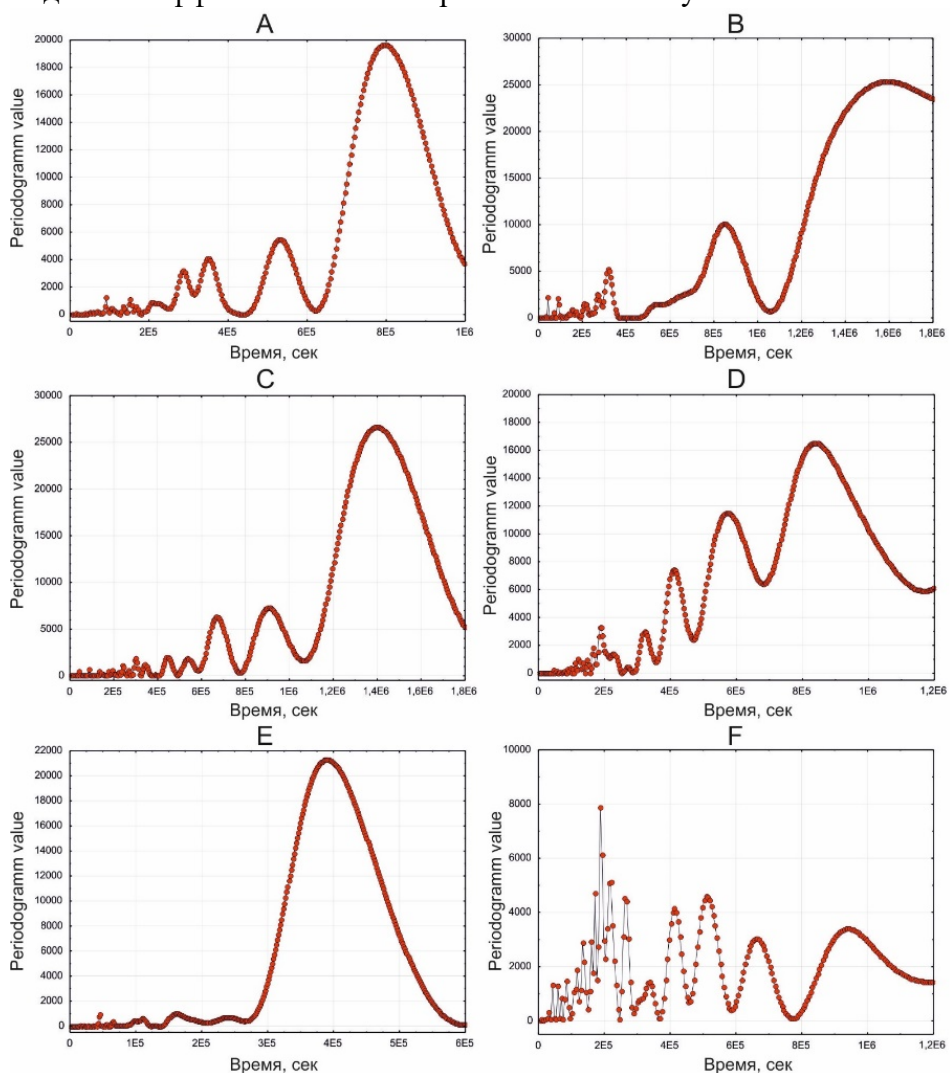


Рисунок 3 –  
 Спектрограммы  
 временного ряда  
 деформаций  
 ледового покрова  
 по датчику 2.3 с 9  
 часов до 16 часов 07  
 марта 2021 г.  
 для почасовых  
 интервалов:  
 9–10ч (А);  
 10–11ч (Б);  
 11–12ч (В);  
 12–13ч (Г);  
 13–14ч (Д);  
 14–15ч (Е);  
 15–16ч (Ё).  
 Ж – графическое  
 отображение  
 исходных данных



Спектральный анализ микросейсмических шумов до и после землетрясения, показал, что за 14 часов до землетрясения на сейсмограмме наблюдается постепенно увеличение амплитуд колебаний в частотном диапазоне от 0,01 до 0,1 Гц. Максимальное увеличение амплитуд колебаний составляет 19,5 относительно фона. Увеличение фона наблюдалось также в течение 9 часов после главного толчка. За это время было зафиксировано 23 афтершока. Поляризационный анализ микросейсмического шума показал четко выраженную ориентацию колебаний в юго-восточном направлении (средний азимут – 121°), что хорошо согласуется с азимутом на эпицентр основного толчка – 124,6°. Анализ сейсмограмм за предыдущий период (с 01 декабря) и через 10 часов после Кударинского землетрясения подобных эффектов в поле микросейсмических шумов не выявил.



*Рисунок 4 –  
Результаты  
спектрального анализа  
данных деформаций  
горных пород в пункте  
Бугульдейка для  
временных интервалов:  
1–30 сентября (а),  
1–31 октября (b),  
1–30 ноября (с),  
1–9 декабря (d),  
11–31 декабря (e),  
1–31 января, 2020 (f)*

Сравнение приведенных результатов показывает, что низкочастотные автоволновые колебания, проявляющиеся перед ледовыми ударами, имели место и перед Кударинским землетрясением, что позволяет рассматривать их как перспективный краткосрочный предвестник тектонического землетрясения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований и Государственным фондом естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-55-53019 с использованием Уникальной научной установки (УНУ) «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов».*

### Список литературы

1. Добрецов Н.Л., Псахье С.Г., Ружич В.В., Попов В.Л., Шилько Е.В., Гранин Н.Г., Тимофеев В.Ю., Астафуров С.В., Димаки А.В., Старчевич Я. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре // Доклады РАН. - 2007. - Т. 412, № 5. - С. 656-660.
2. Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Димаки А.В., Ружич В.В., Панченко А.Ю. Модельные исследования процессов возникновения и развития деформационных структур субдукционного типа в ледовом покрове озера Байкал // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 1. С. 55-65
3. Салко Д.В., Борняков С.А. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы. 2014. № 6. С. 24-28.
4. Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 289-299.
5. Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // The Astrophysical Journal. 1982. Vol. 263. P. 835-853.
6. Lomb N.R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. Astrophys. Sp. Sci. 1976. Vol. 39. P. 447-462. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00648343>.
7. Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. 3. Fourier transforms. Autocorrelation function and cross-correlation functions of unevenly spaced data. The Astrophysical Journal. 1989. Vol. 343. P. 874-887. DOI: <https://doi.org/10.1086/167757>.
8. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. М. : Мир, 2002. 460 с.
9. Хакен Г. Синергетика. М. : Мир, 1980. 404 с.

# РАЗДЕЛ VI. МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ И КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

## CHAPTER VI. MECHANISM OF FUNCTIONING OF GEYSERS AND CATASTROPHIC PROCESSES IN HYDROTHERMAL SYSTEMS

УДК 544.032.14+550.461

### Влияние вторичных минералов на показания Na-K геотермометра на примере гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка)

А.В. Сергеева<sup>1</sup>, А.В. Кирюхин<sup>1,2</sup>, О.О. Усачева<sup>1</sup>, Е.В. Карташева<sup>1</sup>, М.А. Назарова<sup>1</sup>,  
А.А. Кузьмина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
anastavalers@gmail.com*

<sup>2</sup>*ФГБУН Кроноцкий биосферный заповедник, Россия*

Многолетние наблюдения за параметрами продуктивного геотермального резервуара Долины Гейзеров показали устойчивое повышение температуры в течение последних 10 лет, в среднем, со 165 до 235 °С, что приближается к показателям гидротермального взрыва пароводяной смеси. Поэтому в статье рассмотрена применимость геохимических Na/K-геотермометров в условиях, когда воды контактируют с взвесями вторичных ионообменных минералов, влияющих на соотношение катионов в растворе. На термальных полях Долины Гейзеров и других термопроявлениях, в результате проработки вмещающих пород парогидротермами, происходит образование широкого спектра минералов, среди которых интерес представляют цеолиты, такие как морденит, гейландит и клиноптилолит, и слоистый силикат монтмориллонит.

Для анализа химических геотермометров использовано TOUGHREACT-моделирование, с помощью которого на одноэлементной модели воспроизведены ранее известный Na-K полевошпатовый геотермометр и получены новые формулы для цеолитового и смектитового Na-K геотермометров.

Смектит избирательно поглощает натрий, и по результатам моделирования соотношение натрия и калия в растворе снижается до диапазона 2,5–12 в интервале температур 25 – 250 °С, если концентрации выражены в моль/л или моль/кг. Цеолиты действуют подобно монтмориллониту, понижая соотношение натрия и калия до диапазона 22–34, если концентрации выражены в моль/л или моль/кг, в интервале температур 25–250 °С. Для полевошпатового геотермометра диапазон соотношений Na/K лежит в пределах 10–550 в интервале температур 225–25 °С, причем низкое соотношение соответствует высоким температурам.

В грязе-водных котлах Долины Гейзеров, где в составе глинистых фракций присутствуют монтмориллонит и цеолиты, соотношение Na/K составляет 33–35 и определяется, по всей видимости, цеолитами.

**Ключевые слова:** TOUGHREACT, моделирование, Долина Гейзеров, геотермометры, цеолиты, монтмориллонит, геотермальный резервуар

### Influence of secondary minerals on Na-K geothermometer readings in the Valley of Geysers hydrothermal system (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka)

Anastasia Sergeeva<sup>1</sup>, Alexey Kiryukhin<sup>1,2</sup>, Olga Usacheva<sup>1</sup>, Elena Kartasheva<sup>1</sup>, Maria Nazarova<sup>1</sup>,  
Anna Kuzmina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

<sup>2</sup>*FSBI «Kronotsky State Biosphere Reserve», Russia*

Long-term observations of the parameters of the productive geothermal reservoir of the Valley of Geysers showed a steady increase in temperature over the past 10 years, on average, from 165 to 235 °C, which is close to the indicators of hydrothermal explosion of steam-water mixture. Therefore, this article considers the applicability of geochemical Na/K-geothermometers under conditions when waters are in contact with suspensions of secondary ion-exchange minerals affecting the ratio of cations in solution. In the thermal fields of the Valley of Geysers and other thermal occurrences, a wide range of minerals, among which zeolites such as mordenite, heylandite and clinoptilolite, and the layered silicate montmorillonite are of interest, are formed as a result of working through the host rocks by steam-hydrotherms.

TOUGHREACT modeling was used to analyze chemical geothermometers, using which the previously known Na-K feldspathic geothermometer was reproduced on a single-element model and new formulas for zeolite and smectite Na-K geothermometers were obtained.

Smectite selectively absorbs sodium, and simulation results show that the sodium/potassium ratio in solution decreases to a range of 3-11 in the temperature range of 25-250 °C when concentrations are expressed in mol/L or mol/kg. Zeolites act similarly to montmorillonite, lowering the sodium-potassium ratio to a range of 22 - 34 when concentrations are expressed in mol/L or mol/kg, in the temperature range 25-250 °C. For the feldspar geothermometer, the range of Na/K ratios is between 10 and 550 in the 225-25 °C temperature range, with the low ratio corresponding to high temperatures.

In the mud-water boilers of the Valley of Geysers, where montmorillonite and zeolites are present in the clay fractions, the Na/K ratio is 30-35 and is apparently determined by zeolites.

**Keywords:** TOUGHREACT, modeling, Valley of Geysers, geothermometers, zeolites, montmorillonite, geothermal reservoir

### **Введение**

В период 1969–2003 гг. Na/K-геотермометр в Долине Гейзеров показывал медленное снижение температуры резервуара со скоростью 0,3–0,9 °C/год, при диапазоне 165–185 °C. После гигантского оползня 3 июня 2007 года медленный убывающий тренд сменился быстрым возрастанием температуры со скоростью 4,2–5 °C/год, а диапазон температур сместился в сторону более высоких значений, 180–230 °C (Кирюхин, 2020). Подъем температуры в Гейзерном резервуаре может иметь две независимые причины: магматическая активность вулкана Кихпиньч и сбой в показаниях Na/K-геотермометра, который может быть вызван наличием вторичных ионообменных минералов. Классические уравнения Na/K-геотермометров выведены для взаимодействия полевых шпатов с водой (Truesdell et al, 1975; Алексеев, 2002).

К рассмотренным вторичным минералам, которые могут вызвать сбой в показаниях Na/K-геотермометра, относятся цеолиты и монтмориллонит, оба класса являются эффективными ионообменниками. Установление равновесия по Na и K в случае полевых шпатов происходит медленно, а цеолиты и монтмориллонит характеризуются быстрой кинетикой обмена, мелкодисперсностью и легкостью образования взвесей, облегчающих обменные процессы. Поэтому необходимо учесть потенциальное влияние ионообменных минералов на показания Na/K-геотермометры. Цеолиты типа морденита, гейландита и клиноптилолита образуются в результате разгрузки гейзеров, при этом может сформироваться как самоизолирующийся канал, так и массивный образец цеолитизированного туфа (Kiryukhin et al, 2020). Для формирования цеолитов благоприятны щелочные среды. Монтмориллонит же формируется в слабокислых-близнейтральных средах, более характерных для грязеводных котлов. Поэтому в настоящей работе было смоделировано взаимодействие «вода – порода» с цеолитами, монтмориллонитом и полевыми шпатами. Были отобраны пробы воды из гейзеров, грязеводных котлов, реки Долины Гейзеров, а также глинистые фракции грязеводных котлов, контактировавшие с отобранными водами.

### **Моделирование, материалы, методы**

Для моделирования в программном комплексе TOUGHTREACT-EOS2 создана одноэлементная модель, концепция которой изображена на рис. 1. Начальные условия: давление 60 бар, температура 210 °C, парциальное давление CO<sub>2</sub> задано нулевым.

Материальные свойства в модели определены следующим образом: плотность 2700 кг/м<sup>3</sup>, пористость 0,1, проницаемость 10–12 м<sup>2</sup>, теплопроводность 2 Вт/(м × °С), теплоемкость 850 Дж/(кг × °С). Удельный расход воды соответствует продуктивному Гейзерному резервуару, состав воды отвечает каноническому, взятому для гейзера Великан. Модель представляет собой куб со стороной 100 м, с проточной циркуляцией, с постоянным расходом 5,8 кг/с. Проточная циркуляция определена водоотбором из заданной на модели скважины с одновременной инъекцией в элемент модели постоянного расхода воды с заданной энтальпией (приток глубинного теплоносителя или инфильтрационных вод). Время моделирования задано 1000 лет.

Данные моделирования равновесного состава вод преобразовывались в координаты 1000/Т и lg(C<sub>i</sub>/C<sub>j</sub>), где C<sub>i</sub> и C<sub>j</sub> – концентрации соответствующих компонентов раствора в массовых или молярных единицах (г/л, мг/л, ppm, моль/л и пр.). Линеаризованные участки полученных графиков описывались уравнением вида  $y = A + Bx$ , где  $y = \lg(C_i/C_j)$ ,  $x = 1000/(t + 273,15)$ , из которого выводили уравнение геотермометра:

$$t = \frac{1000B}{\lg \left[ \frac{C(Na^+)}{C(K^+)} \right] - A} - 273,15 \quad (1)$$

Глинистые фракции грязеводных котлов Долины Гейзеров, и контактирующих с ними вод проанализированы на базе Аналитического Центра ИВиС ДВО РАН. Определение состава глинистых фракций проводили с помощью рентгеновской дифрактометрии. Для определения раздвижных смектитовых слоев, дифрактометрическую съемку вели в воздушно-сухом и насыщенном глицерином состояниях.

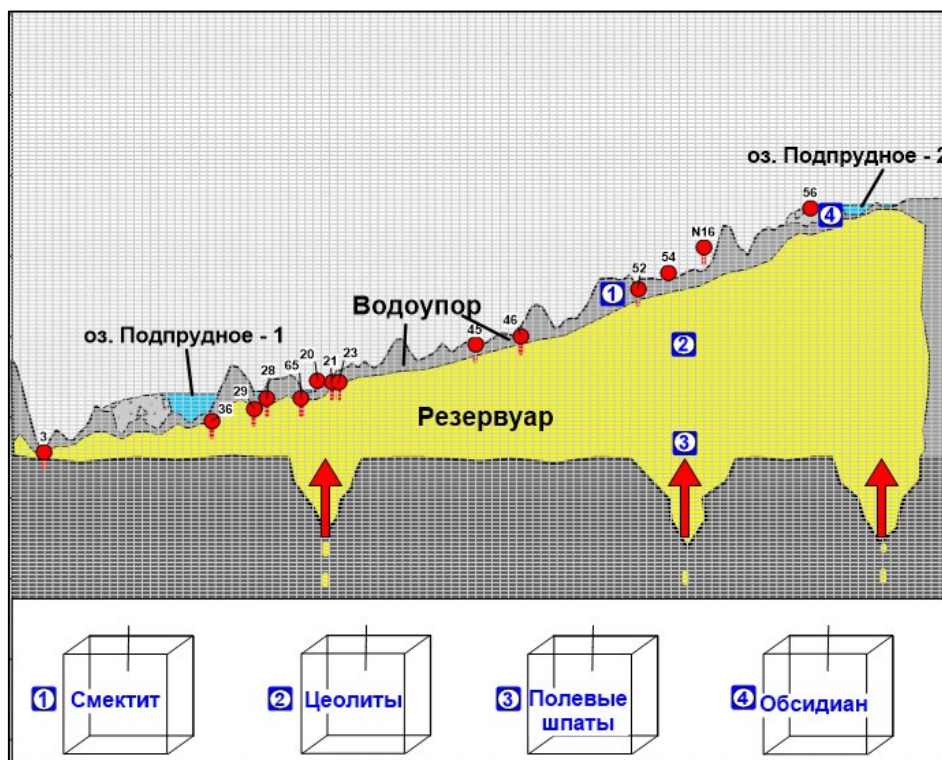


Рисунок 1 – Одноэлементная модель, имитирующая фрагмент Гейзерного резервуара в зонах с различным минеральным составом:

- 1 – К-монтмориллонит + Na-монтмориллонит + Са-монтмориллонит;  
 2 – морденит + клиноптилолит (clinopt/10); 3 – полевой шпат + альбит высокий + альбит низкий;  
 4 – вулканическое стекло (glass3)

### Результаты и обсуждение

За период 2010–2018 гг., для вод гейзеров соотношения  $C(\text{Na}^+)/C(\text{K}^+)$  лежали в пределах 8,5–25,5 (концентрации  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  выражены в моль/л), верхняя граница диапазона отвечает полевошпатному геотермометру с температурой 160–180 °С и соответствует состоянию резервуара, фиксировавшемуся до схода селевых потоков. Обнаружено, что при взаимодействии термальной воды с монтмориллонитом, в диапазоне температур 25–250 °С, соотношения концентраций  $\text{Na}/\text{K}$  лежат в пределах 2,5–12, для цеолитов диапазон соотношений  $\text{Na}/\text{K}$  22–34. Наиболее широкий диапазон отмечается для полевых шпатов, для которых соотношения  $\text{Na}/\text{K}$  лежат в пределах 10–550 (концентрации  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  выражены в моль/л). Для полевошпатного  $\text{Na}/\text{K}$ -геотермометра низкие значения соотношения отвечают высоким температурам и наоборот. Поэтому любые процессы, понижающие соотношение  $\text{Na}/\text{K}$ , приводят к кажущемуся повышению температуры резервуара.

В таблице 1 показаны коэффициенты уравнений геотермометров для полевых шпатов, цеолитов и монтмориллонита. Чувствительность геотермометра определяется параметром  $B$ , поэтому самым чувствительным является полевошпатный геотермометр, на втором месте – монтмориллонитовый, но он применим лишь при температуре до 150 °С и не выше.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения  $t = \frac{1000B}{\lg\left[\frac{C(\text{Na}^+)}{C(\text{K}^+)}\right]^{-A}} - 273,15$  для различных минералов

Минеральная ассоциация	Температурный диапазон, °С	$A$ (для молярной концентрации)	$B$
Альбит, анортит, микроклин	25–250	–1,454	1,239
Монтмориллонит	25–125	–1,038	0,612
Цеолиты (морденит, гейландит, клиноптилолит)	25–125	1,380	–0,012
	125–250	2,178	–0,349

Значения соотношений  $\text{Na}/\text{K}$  около 8,5, порой фиксирующиеся после схода селя, приближаются к смектитовым водам, с температурой в диапазоне 5–50 °С. Ситуация отвечает контакту вод, разгружающихся на поверхность в виде гейзерных фонтанов, с прогретыми грунтами, сложенными смектитом, при котором соотношение  $\text{Na}/\text{K}$  понижается. Смектитовые воды потенциально могут вызывать искажения полевошпатных геотермометров, завышая показания температуры.

В составе глинистых фракций грязеводных котлов Долины Гейзеров присутствуют цеолиты, монтмориллонит, кварц, полевые шпаты (рис. 2), а соотношение  $\text{Na}/\text{K}$  в растворе для исследованных точек ближе к тому, которое получается при ионном обмене с цеолитами (табл. 2), около 33–35. Отметим, что в самих гейзерах соотношение  $\text{Na}/\text{K}$  разительно отличается от того, что наблюдается даже в ближайших грязеводных котлах, и лежит в диапазоне 19–25.

Таблица 2. Соотношение  $\text{Na}/\text{K}$  в грязеводных котлах и гейзерах Долины Гейзеров

Соотношение $\text{Na}/\text{K}$ , концентрации выражены в моль/л	Состав глинистой фракции	Описание точки
35	Монтмориллонит, морденит	Грязеводный котел около гейзера Большой, $t \sim 100$ °С, $\text{pH} \sim 8,17$
33	Морденит, монтмориллонит	Грязеводный котел около гейзера Великан $t \sim 100$ °С, $\text{pH} = 6,04$ .
21	–	Устье реки Гейзерной, утро.
19	–	Долина Гейзеров, гейзер Первенец
25	–	Долина Гейзеров, гейзер Большой
23	–	Устье реки Гейзерной, вечер.
20	–	Долина Гейзеров, гейзер Великан

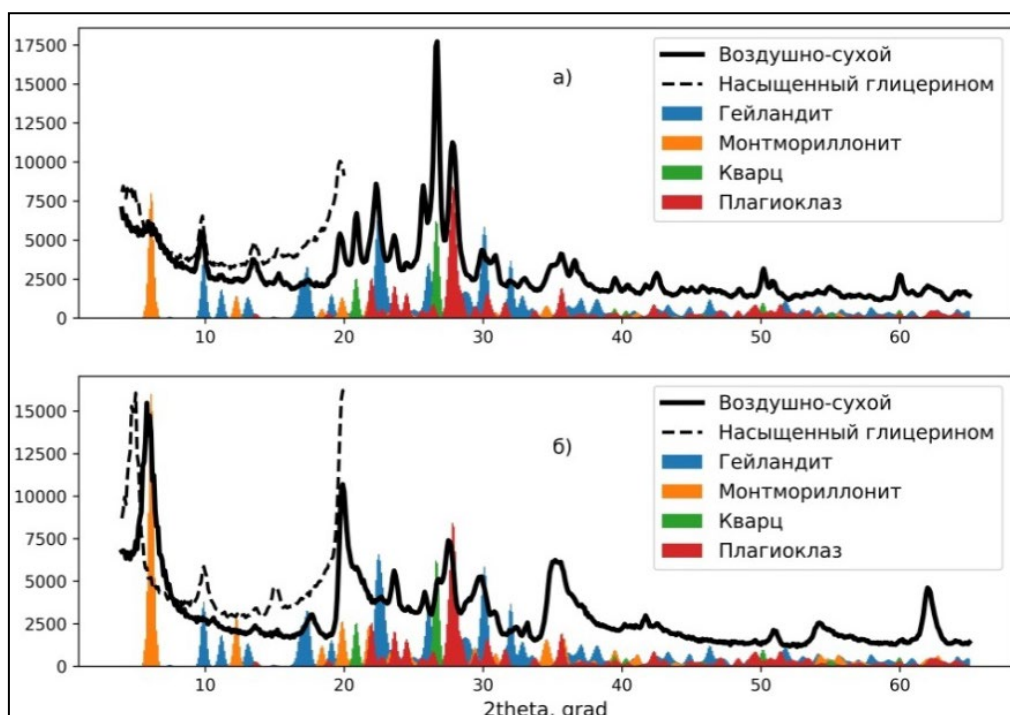


Рисунок 2 – Минеральный состав глинистой взвеси из грязевого котла около гейзера Большой (а) и Великан (б)

### Заключение

Инфильтрация поверхностных вод в резервуар может привести к искажению значений температур, рассчитанных по геохимическим Na/K-геотермометрам. В приповерхностной части гидротермальной системы Долины Гейзеров, воды имеют возможность контактировать с ионообменными вторичными минералами, в основном благодаря формированию грязеводных котлов. Именно в грязеводных котлах активно образуется монтмориллонит, если среда слабокислая или близнейтральная, а также диспергируются цеолиты. По предварительным данным, цеолиты в грязе-водных котлах контролируют соотношение Na/K, которое составляет 33–35.

### Список литературы

1. *Кiryukhin A.B.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *A.B. Kiryukhin*. СПб.: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
2. *Truesdell A.H.* Calculation of deep temperatures in geothermal systems from the chemistry of boiling spring waters of mixed origin / *A.H. Truesdell, R.O. Fournier* // Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, May, 1975. Vol. 1. P. 837–844. U.S. Gov. Printing Office.
3. *Алексеев В.А.* Кинетика и механизмы реакций полевых шпатов с водными растворами / *В.А. Алексеев*. М.: ГЕОС, 2002. Т. 256. С. 246.
4. *Kiryukhin A.V.* Simulating the conditions of generation for permeable geyser channels in areas of acid volcanism / *A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, A.V. Sergeeva* // Journal of Volcanology and Seismology. 2020. Vol. 14. P. 71-82.

## **Анализ данных за 2021 г. по режиму гейзеров Большой и Великан (Долина Гейзеров, Камчатка)**

**О.О. Усачева, А.В. Кирюхин**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
lel89@yandex.ru*

В период с 26 по 30 августа 2021 года на реке Гейзерной и гейзерах Большой и Великан велись непрерывные наблюдения за температурой, расходом реки и электропроводностью речной воды. В результате обработки данных, получены значения объемов извергаемой воды гейзерами Большой и Великан и интервалы между извержениями гейзеров. Полученные данные сопоставлены с данными за предыдущие года с целью выявления изменения в объемах изверженной воды и интервалами между извержениями для оценки динамики работы гейзеров.

**Ключевые слова:** Долина Гейзеров, режим гейзеров, Камчатка

## **Analysis of data obtained in 2021 of the Bolshoy and Velikan geysers regime (Valley of Geysers, Kamchatka)**

**Olga Usacheva, Alexey Kiryukhin**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

In the time period from August 26 to August 30, 2021, continuous observations of temperature, river flow and electrical conductivity of river water were conducted on the Geysers River and the Bolshoy and Velikan geysers. As a result of data processing, the values of the volumes of water erupted by the Bolshoy and Velikan geysers and the intervals between geysers eruptions were obtained. The data obtained were compared with data for previous years in order to identify changes in the volume of erupted water and the intervals between eruptions to assess the dynamics of geysers.

**Keywords:** Valley of Geysers, geysers mode, Kamchatka

### **Введение**

В период с 26 по 30 августа 2021 года на реке Гейзерной и гейзерах Большой и Великан (Долина Гейзеров, Камчатка) велись непрерывные наблюдения за температурой, расходом реки и электропроводностью речной воды.

Для измерений температуры использовались логгеры температуры НОВО U12–015. Логгеры, установленные в месте разлива воды из канала гейзера, регистрировали температуру вытекающей воды каждые 5 минут. Для определения содержания хлор-иона в р. Гейзерной использовались логгеры измерения электропроводности НОВО U24–001. Пересчет значений электропроводности в содержание хлора (ppm) осуществлялся по формуле (Рычкова Т.В. и др., 2021):

$$Cl = -3,461 \times T + 0,254 \times Sc + 31,451 \quad (1)$$

Полученные данные представлены на графике (Рис. 1).

Каждому пиковому значению температуры (ассоциируются с извержением гейзера) приведено в соответствие повышение содержания хлор-иона в речной воде.

Расход реки Гейзерной определяется по уровню воды в реке, который, в свою очередь, автоматически регистрируется парой логгеров НОВО U20-001-04 с заданным интервалом измерений 20–30 мин (один регистрирует барометрическое давление, другой, будучи размещенным в реке, регистрирует давление водяного столба и атмосферного давления). Формула зависимости уровень воды в реке – расход воды была откалибрована по результатам измерений расхода с использованием прибора Mainstream 400P. Доплеровский



расходомер Mainstream 400P, предназначенный для измерений и записи потоков в открытых руслах, измеряет фактическую среднюю скорость реки (точность 1 см/с, диапазон от 1 см/с до 5 м/с) (Kiryukhin et al, 2022).

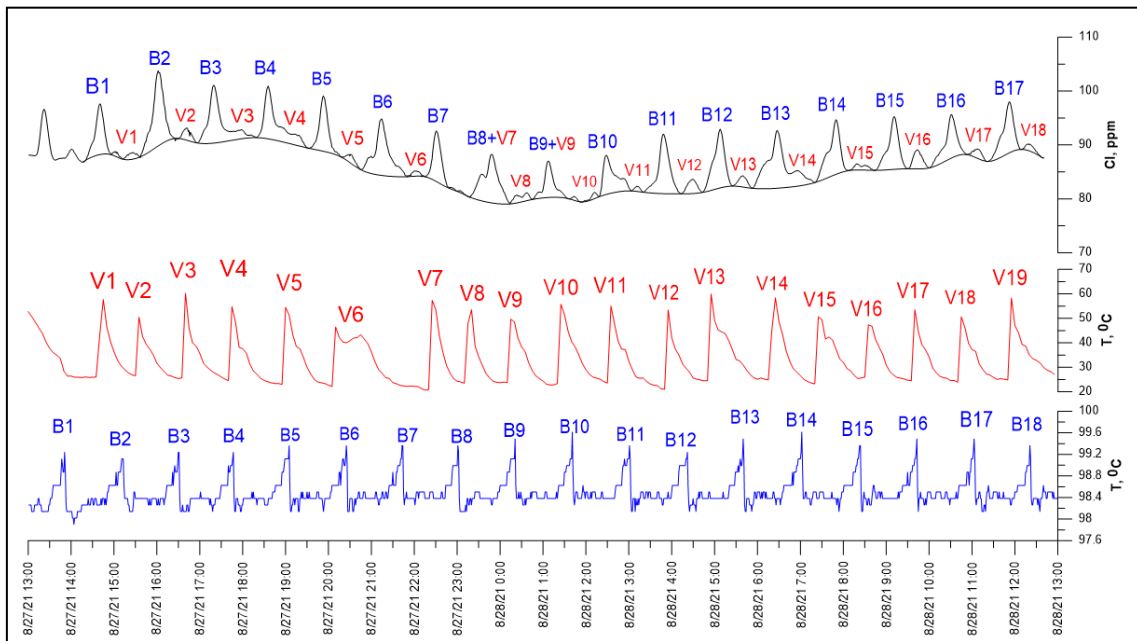


Рисунок 1 – исходные данные по изменению температуры на изливе гейзера Большой (синяя линия), Великан (красная линия) и изменение содержания хлора в речной воде р. Гейзерная на створе 1 (черная линия)

### Обработка данных

Объем изверженной воды гейзером Большой (В) и Великан (V) вычисляются по формуле:

$$V = M / Cg \quad (2)$$

M – масса хлора в изверженной гейзером воде, Cg – концентрация хлора в гейзере (величина известная, для гейзера Большой составляет 700 ppm, для гейзера Великан – 780 ppm).

Для нахождения массы хлора в воде гейзера используется формула:

$$M = Q_r \int_{t1}^{t2} C(t)dt \quad (3)$$

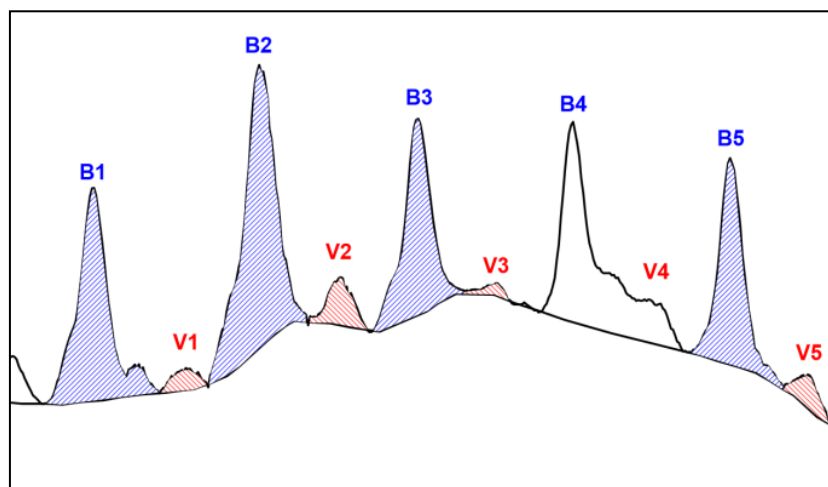


Рисунок 2 – Пример определения площади импульсов хлора. Синяя штриховка – поступление хлора в реку при извержении гейзера Большой, красная штриховка – гейзера Великан

$Q_r$  – расход реки – известная величина, регистрируемая на Створе 1 и Створе 2, в те моменты времени, на которые приходились максимумы значений хлора, ассоциированные с извержениями гейзеров Большой и Великан. Интеграл – площадь фигуры, ограниченной двумя кривыми: сверху это график изменения хлора в речной воде от времени, снизу – огибающая по минимальным значениям. Для вычисления площади импульса использовалась программа Surfer (Golden Software), которая автоматически подсчитывает площадь выделенной вручную фигуры (Рис. 2).

Для определения интервалов между извержениями (ИВЕ) гейзеров Большой и Великан использовались данные по температуре воды, изливающейся из каналов гейзеров. Данные получены в период с 23 апреля по 27 августа 2021 года. Временные интервалы между предыдущим и следующим максимальными значениями температур на записи логгера принимались равными интервалам между извержениями. На гистограммах показаны распределения интервалов между извержениями (ИВЕ – interval between eruption) для гейзеров Великан (Рис. 3а) и Большой (Рис. 3б). В среднем для гейзера Великан ИВЕ составил 60 мин, для гейзера Большой – 65 мин.

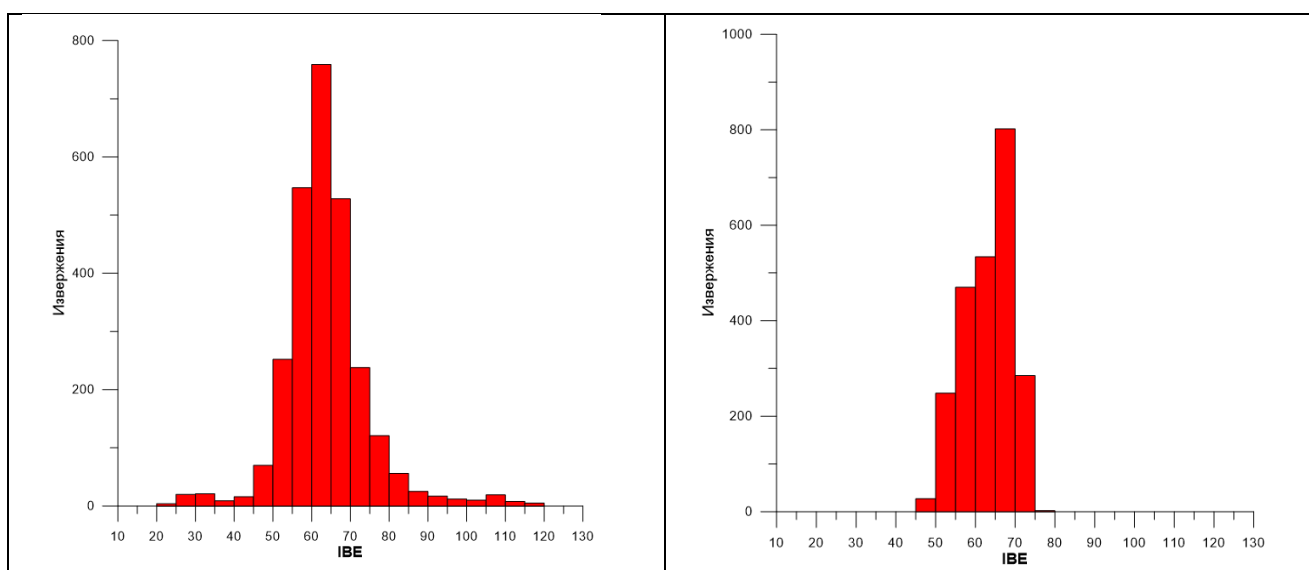


Рисунок 3а – интервалы между извержениями гейзера Великан в период с 23.04.2021 по 27.08.2021

Рисунок 3б – интервалы между извержениями гейзера Большой в период с 23.04.2021 по 27.08.2021

## Выводы

По данным за 2021 год были определены средние значения объема извергаемой воды гейзером Большой –  $41,2 \text{ м}^3$  и Великан –  $4,7 \text{ м}^3$ . Определены средние значения ИВЕ гейзеров Большой и Великан по данным измерений температуры на изливе – 76 и 66 минут соответственно.

## Заключение

В сравнении с данными с 08.2016 по 04.2021, приведенными в (Kiryukhin et al, 2022), ИВЕ гейзеров Великан и Большой практически не изменились и составили в среднем 66 минут (минимальное значение 57,5 – максимальное 61,7 мин за предыдущий период) и 76 минут (минимальное значение 64,2 – максимальное 73,3 мин за предыдущий период) соответственно.

Наибольшие изменения наблюдаются в объемах изверженной гейзерами воды (Рис. 4). Для гейзера Большой это значение составило  $41,2 \text{ м}^3$ , что почти в два раза больше, чем максимальное значение за предыдущие года, начиная с 2018 г. Объем извержения гейзера Великан  $4,8 \text{ м}^3$  так же является максимальной величиной в течение 4-х лет наблюдений.

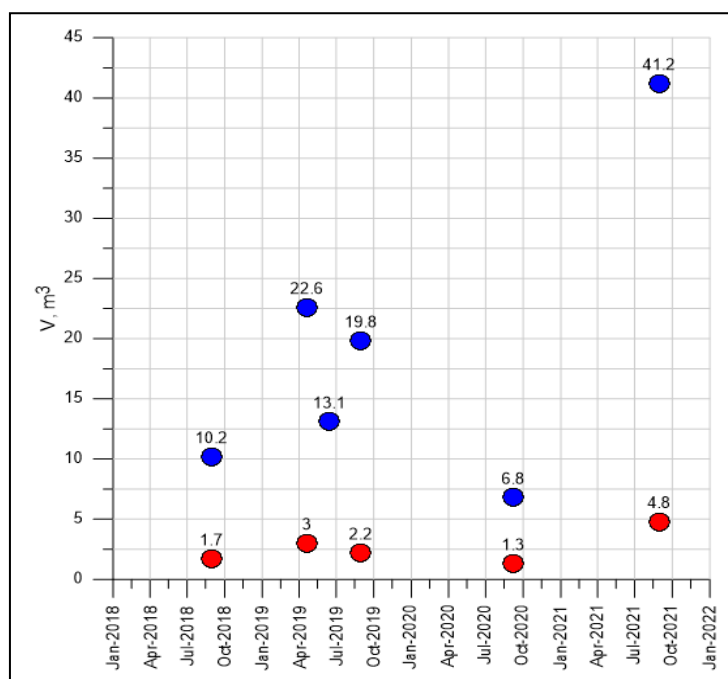


Рисунок 4 – Объемы извержений гейзера Большой (синие точки) и гейзера Великан (красные точки), рассчитанные по данным за 2018 – 2021 гг.

В связи с недавними наблюдениями сотрудниками Кроноцкого заповедника, зарегистрировавшими несколько извержений гейзера Грот (<https://kam24.ru/news/main/20220620/89769.html>, дата обращения 17.08.2022), являющегося самым мощным по количеству изверженной воды и самым нерегулярным гейзером в Долине Гейзеров, необходимо отслеживать изменение в режиме гейзеров для оценки состояния системы и, возможно, предсказания опасных процессов.

Работа выполнена по проекту № 0282-2018-0017.

### Список литературы

1. Рычкова Т.В. Хлоридный метод оценки тепловой мощности гидротермальных систем / Т.В. Рычкова, О.О. Усачева, А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2021 года. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 145–148.

2. Kiryukhin A.V. Dynamics of natural discharge of the hydrothermal system and geyser eruption regime in the Valley of Geysers, Kamchatka / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, N.B. Zhuravlev et al. // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 136. P. 105166. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105288

## Применение хлоридного трассерного метода для оценки объемов извержений гейзеров и динамики разгрузки гидротермальных систем

А.В. Кирюхин

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
AVKiryukhin2@mail.ru*

Разработан высокочастотный ( $\text{мин}^{-1}$ ) метод хлоридного трассера основан на измерениях электропроводности речной воды и доплеровской расходомерии. Метод применен для определения динамики разгрузки глубинного теплоносителя ( $Q_d$ ) и объемов извержений гейзеров в Долине Гейзеров.

**Ключевые слова:** трассер, хлоридный, гейзер, разгрузка, гидротермальный

## Application of the chloride tracer method to estimate the volume of geyser eruptions and the dynamics of mass discharge of hydrothermal systems

Alexey Kiryukhin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

A high-frequency ( $\text{min}^{-1}$ ) chloride tracer method was developed based on electrical conductivity measurements of river water and Doppler flowmetry. The method was applied to determine the dynamics of deep geothermal fluid discharge ( $Q_d$ ) and volumes of geyser eruptions in the Valley of Geysers.

**Keywords:** tracer, chloride, geyser, discharge, hydrothermal

### Введение

Метод хлоридного трассера включает измерения массового расхода хлоридов ( $Q_{cl}$ ) для оценки разгрузки глубинного теплоносителя  $Q_d$  в гидротермальных системах впервые применены в Новой Зеландии (Ellis and Wilson, 1955). Эффективность метода поддерживается автоматической компенсацией кипения и смешения. В.В. Аверьев также применил хлоридный метод для оценки  $Q_d$  в мае 1958 года (в маловодный период) для термальных вод Паужетского геотермального месторождения на Камчатке (Аверьев, Сугрובה, 1965). Для этого была выполнена оценка притока хлорид-ионов  $Q_{cl}$  в р. Паужетка с термального участка, через который протекала река. Это было сделано на основе гидрометрических измерений и отбора химических проб выше и ниже по течению от участка разгрузки термальных вод.  $Q_{cl}$ , который река Паужетка получает при протекании на участке термальной разгрузки, был оценен в 0,1497 кг/с. Принимая родительскую массовую долю хлорид-иона  $C_{upflow}$  в термальной воде равной  $1,58 \times 10^{-3}$ , глубинная термальная составляющая  $Q_d$  была оценена как,  $Q_d = Q_{cl}/C_{upflow}$ , что равно 95 кг/с. Магмо-гидротермальная система Йеллоустонского национального парка (YNP) является наиболее известным примером применения хлоридного трассерного метода (R. Fournier, 1989, Ingebritsen et al. 2001).

В данной работе для разгрузки глубинного теплоносителя ( $Q_d$ , кг/с) использовались массовый расход реки ( $Q_r$ , кг/с) и массовая доля Cl (кг/кг) в реке ( $C_r$ ). С этой целью рассмотрим балансы массы воды и трассера (Cl) в бассейне реки с дискретной разгрузкой  $Q_d$ . Баланс массы воды составляет:

$$Q_r = Q_d + Q_{upstream} \quad (1)$$

– где,  $Q_{upstream}$  массовый расход реки выше точки разгрузки. Баланс трассера (Cl) записывается следующим образом:

$$C_r \times Q_r = C_{upflow} \times Q_d + C_b \times Q_{upstream} \quad (2)$$

– где,  $C_r$  массовая доля хлоридов в реке,  $C_{upflow}$  - массовая доля Cl в глубинном теплоносителе,  $C_b$  - фоновая массовая доля Cl в метеорных водах.

Подставляя  $Q_{upstream}$  из (1) в (2), получим выражение для  $Q_d$ :

$$Q_d = Q_r \times (C_r - C_b) / (C_{upflow} - C_b) \quad (3)$$

Учитывая, что массовая разгрузка Cl в реке, связанная с глубинным теплоносителем, равна  $Q_{cl} = C_{upflow} \times Q_d$ , получим:

$$Q_{cl} = C_r \times Q_r - C_b \times (Q_r - Q_d) = Q_r \times (C_r - C_b) + Q_d \times C_b \quad (4)$$

Фоновые значения  $C_b$  пренебрежимо малы (от 0,2 до 0,7 ppm), как показывают наблюдения в Каскадных хребтах Орегона и YNP (Norton and Friedman, 1991), в реке Гейзерная  $C_b$  менее 2 ppm (массовая доля  $2 \cdot 10^{-6}$ ) (выше по течению от Хлоридного кипящего источника). Поэтому уравнения (3) и (4) преобразуются к более простому виду:

$$Q_d = Q_r \times C_r / C_{upflow} \quad (5)$$

$$Q_{cl} = Q_r \times C_r \quad (6)$$

Конвективная тепловая разгрузка CHF может быть получена из уравнения (5):

$$CHF = h_d \times Q_d \quad (7)$$

– где  $h_d$  - энтальпия глубинного теплоносителя. Если в глубинном резервуаре преобладают однофазные условия, то  $h_d$  может быть заменена на энтальпию воды  $h_w$ , а для оценки температуры глубинного резервуара  $T$  могут использоваться водные химические геотермометры. Далее  $h_w$  определяется как функция от  $T$ , а CHF может быть выражена в виде:

$$CHF = h_w(T) \times Q_d \quad (8)$$

Хлоридный трассерный метод требует для расчета  $Q_d$  (формула 5) данных о концентрации хлоридов и расходе водотока, которые на первых этапах его применения получались с помощью синхронизированного отбора водных проб и гидрометрических измерений. Оценка  $Q_d$ , полученная в Йеллоустоуне составила в среднем 3000 кг/с с изменением на 25–50% в течение гидрологического годового цикла, при этом погрешность оценивания достигала 20–30% (Fournier, 1989). В последнее время для оценок  $Q_d$  применяются регистраторы удельной проводимости (с учетом корреляции проводимости и концентрации Cl) и автоматизированные акустические доплеровские расходомеры (McCletsky et al, 2012).

### **Методика применения хлоридного трассерного метода**

#### **Измерения и оценки массового расхода воды $Q_r$ и хлоридов $Q_{cl}$ в реке Гейзерная, разгрузки глубинного теплоносителя $Q_d$**

Доплеровский расходомер Mainstream 400P использовался с 2016 года для измерения и регистрации расхода воды в реке Гейзерная. В Mainstream встроен ЦПУ (центральный процессор - аналого-цифровой преобразователь), датчик уровня, который измеряется с помощью пьезорезистивного датчика (точность 0,7 см). Скорость реки измеряется с помощью датчика скорости с доплеровским эффектом. Mainstream измеряет фактическую среднюю скорость (точность 1 см/с, диапазон от 1 см/с до 5 м/с). Во время измерений Mainstream 400P был проинструментирован измерять и рассчитывать среднюю скорость в прямоугольнике сечения  $h \times L$ , где  $h$  - ширина потока (была назначена равной 3,5 м как средняя эффективная ширина реки Гейзерная),  $L$  - уровень воды в потоке (который

Mainstream измеряет сам). В случае, если фактическая ширина  $h$  не равнялась 3,5 м, к оценкам расхода воды Mainstream 400P применялся коэффициент  $h/3,5$ .

Кроме того, для регистрации уровня и расхода реки Гейзерной использовалась пара регистраторов НОВО U20-001-01 (точность измерения уровня воды 0,5 см) с установленным интервалом измерений 10–20 мин. Один логгер регистрировал барометрическое давление, а другой был установлен в реке для регистрации полного давления водного столба и атмосферного давления. Уровень воды в реке определялся по разнице между показаниями давления двух регистраторов. Линейная формула для определения расхода реки  $Q_r$  по уровню воды откалибрована по результатам измерений расходомера Mainstream 400P.

Разгрузка глубинного теплоносителя оценивалась на створе в устье реки Гейзерная. Для непрерывной регистрации концентрации хлор-иона в речной воде по удельной проводимости раствора использовался логгер НОВО U24-001 (низкий диапазон 0–1000 мкСм/см с установленным интервалом записи от 0,5 до 20 мин). Пересчет удельной электропроводности раствора в концентрацию хлоридов был выполнен с помощью эмпирической формулы, обоснование которой приведено в работе (Kiryukhin et al, 2022):

$$C = -3,461 \times T + 0,254 \times SC + 31,451 + 0,1634 \times \text{Time} \quad (9)$$

где  $C$  - концентрация хлоридов (ppm),  $T$  - температура ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $SC$  – удельная электропроводность (мкСм/см),  $\text{Time}$  – разница во времени между моментом установки регистратора и моментом измерения, дни. Поправки на время измерения, учитывающие загрязнение регистратора, применялись только для долгосрочных измерений.

Для оценки разгрузки глубинного теплоносителя ( $Q_d$ , кг/с) осуществлялась по формулам (5–6). Концентрация  $C_l$  в глубинной воде гидротермальной системы (родительский теплоноситель,  $C_{\text{upflow}}$ ) была принята максимальной до разбавления – 900 ppm (Сугробов и др., 2009).

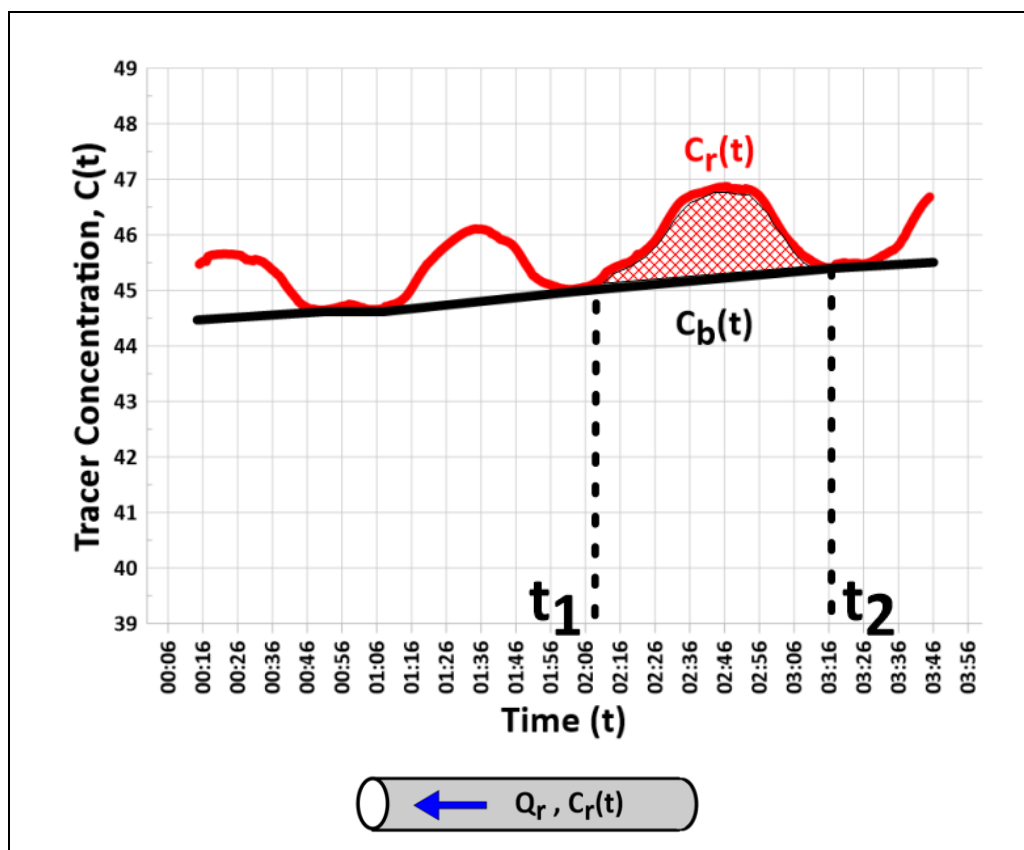


Рисунок 1 – Рисунок, поясняющий метод оценки массы ( $M$ ) трассера, извергнутого в реку, используя уравнение (10).

Легенда:  $Q_r$  – массовый расход реки;  $C_r(t)$  – концентрация трассера в реке;  $C_b(t)$  – фоновый тренд концентрации трассера в реке;  $t$  – время; Заштрихованная область равна  $\int C(t)dt$

### **Применение хлоридного трассерного метода для оценки объемов извержений гейзеров**

Объемы извержений гейзеров Большой и Великан, происходящих с интервалом около 1 часа, можно оценить, используя соотношения, разработанные для импульсного притока хлор-иона в р. Гейзерную после соответствующих извержений (рис. 1). Хлоридный трассерный метод является эффективным инструментом для оценки массы  $M$  (хлорид-иона), извергаемого из гейзера в реку, если известны скорость речного потока  $Q_r$  и зависимость изменения концентрации трассера в реке от времени  $C(t)$  в течение интервала времени перемещения трассера  $[t_1, t_2]$ :

$$M = Q_r \times \int_{t_1}^{t_2} C(t) dt \quad (10)$$

В уравнении (10)  $C(t) = C_r(t) - C_b(t)$  – это циклическая импульсная составляющая концентрации трассера, которая представляет собой разницу между  $C_r(t)$  (концентрация трассера в реке) и  $C_b(t)$  (фоновый тренд концентрации трассера в реке) (рис. 1). Оценив массу трассера (хлорид-иона), извергаемого из конкретного гейзера, можно оценить  $V$ , объем термальной воды, извергаемой из конкретного гейзера, если известна концентрация трассера (хлорид-иона) в гейзере,  $C_g$ :

$$V = M/C_g \quad (11)$$

– где  $M$  – масса хлоридов, извергаемая гейзером, а  $C_g$  – концентрация хлоридов в конкретном гейзере.

Формула (10) может быть переписана относительно расхода реки  $Q_r$  и использована для его оценки (Moore, 2005):

$$Q_r = \frac{M}{\int_{t_1}^{t_2} C(t) dt} \quad (12)$$

### **Полученные результаты (2012-2020) (Kiryukhin et al, 2022)**

В результате применения хлоридного трассерного метода в гидротермальной системе Долины Гейзеров получена оценка средней величины разгрузки глубинного теплоносителя  $Q_d$  в Долине Гейзеров 274 кг/с, массовый расход хлор-иона  $Q_{cl} - 0,247$  кг/с, тепловая мощность – 265 МВт. Установлена сезонная чувствительность  $Q_d$ : в зимнюю межень разгрузка увеличивается (до 340–370 кг/с), а в летне-паводковое время разгрузка уменьшается (до 100–120 кг/с) (2012, 2019 гг).

Высокочастотные наблюдения, начатые с 2017 года (расход и удельная электропроводность,  $1 \text{ мин}^{-1}$ ), позволили выявить импульсные притоки хлор-иона, связанные с извержениями гейзеров и оценить объемы их извержений: гейзер Большой циклически извергал от 5 до 34  $\text{м}^3$ , гейзер Великан – от 0,5 до 4,5  $\text{м}^3$  горячей воды за период наблюдений с 2018 по 2020 год. До катастрофического селя 2014 года гейзер Великан извергал от 24 до 144  $\text{м}^3$ , а гейзер Грот – от 289 до 331  $\text{м}^3$  горячей воды, согласно наблюдениям, проведенным в 2012 году.

Применение хлоридного трассерного метода для постоянного мониторинга разгрузки глубинного теплоносителя в гидротермальной системе Долины Гейзеров может стать важным элементом системы предупреждения катастрофических оползней и селей, вызванных гидротермальной деятельностью.

*Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ и JSPS в соответствии с исследовательским проектом № 21-55-50003.*

### Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А.В. Кирюхин*. СПб.: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
2. *Kiryukhin A.V.* Dynamics of natural discharge of the hydrothermal system and geyser eruption regime in the Valley of Geysers, Kamchatka / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, N.B. Zhuravlev et al.* // *Applied Geochemistry*. 2022. 136, 105166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105166>.
3. *Averiev V.V.* Natural thermal occurrences at the Pauzhetskoye field / *V.V. Averiev, N.G. Sugrobova* // *Pauzhetskiye hot waters in Kamchatka*. Moscow; Nauka, 1965. P. 41–42 (in Russian).
4. *Fournier R.* Geochemistry and dynamics of the Yellowstone National Park Hydrothermal System. / *R. Fournier* // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1989. 17, P. 13–53.
5. *Ingebritsen S.E.* Time-variation of hydrothermal discharge at selected sites in the Western United States: Implications for monitoring / *S.E. Ingebritsen, D.L. Galloway, E.M. Colvard et al.* // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2001. 111. P. 1–23.
6. *Norton D.* Chloride Flux and Surface Water Discharge out of Yellowstone National Park, 1982-1989 / *D. Norton, I. Friedman* // *U.S. GEOLOGICAL SURVEY BULLETIN* 1959. 1991. 52 p.
7. *McCleskey R.B.* Solute and geothermal flux monitoring using electrical conductivity in the Madison, Firehole, and Gibbon rivers, Yellowstone National park / *R.B. McCleskey, L.E. Clor, J.B. Lowenstern et al.* // *Appl. Geochem.* 2012. 27. P. 2370–2381.
8. *Moore R.D.* Slug injection using salt in solution. / *R.D. Moore* // *Streamline Watershed Management Bulletin*. 2005. 8(2). P. 1–6.
9. *Sugrobov V.M.* Geysers Valley – Pearl of Kamchatka / *V.M. Sugrobov, N.G. Sugrobova, V.A. Droznin, et al.* Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2009. 107 p.



## РАЗДЕЛ VII. ДОКЛАДЫ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ ТОЛЬКО ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ

### CHAPTER VII. PAPERS SUBMITTED FOR PUBLICATION ONLY

УДК 556.33 + 550.348 (575.2)

#### Условия формирования геотермальных вод Кыргызского Тянь-Шаня

Дж.Ж. Кендирбаева

*Институт сейсмологии Национальной Академии наук Кыргызской Республики  
jmaevna48@gmail.com*

Выделены прямой, обратный и пульсирующий типы гидрогеохимических зональностей. Первый характерен для глинисто-алевролитовых толщ, второй, существующий в зонах сочленения разломов с наибольшими амплитудами неотектонического смещения, характеризуется активным притоком тепла из недр, а третий, впервые выделенный, обладает пульсирующим режимом и тяготеет к разрезам, где преобладает частая смена неотектонических и сейсмических условий, например, сжатие на растяжение.

**Ключевые слова:** глубинные флюиды, неотектоническое смещение, изотопный состав водорода и кислорода, термальные воды

#### Conditions for the Formation of Geothermal Waters if the Kyrgyz Tien Shan

Dzumagul Kendirbaeva

*Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic*

Allocate direct, reverse and flashing types of hydrogeochemical zonality. The first is characteristic of clayey-silty strata, the second, which exists in the zones of fault junctions with the largest amplitudes of neotectonic displacements, is characterized by an active influx of heat from the depths, and the third has a pulsating regime and tends to areas where frequent changes in neotectonic and seismic conditions prevail, for example, compression in stretching.

**Keywords:** deep fluids, neotectonic displacement, isotopic composition of hydrogen and oxygen, thermal waters

#### Введение

Освоение материально-сырьевого потенциала любого государства зависит от уровня использования местного сырья, а также от технологий, способных заинтересовать производителей в производстве конкурентоспособной продукции на мировом рынке. Именно таким образом добилась существенных и завидных успехов современная китайская промышленность – основной поставщик товаров и услуг нашей республики. В Кыргызстане на основе глубокого анализа и обобщения фактических материалов для решения такой стратегической задачи требуется выявить условия формирования природных ресурсов, к примеру, геотермальных вод, а также установить их взаимосвязь в гидросфере, литосфере, и биосфере, поскольку их химический состав отражает условия взаимодействия живых организмов и неживых представителей природы (Кендирбаева 2014).

Кыргызский Тянь-Шань представляет собой сложное сочетание поднятий и межгорных впадин, рассеченных множеством глубинных разломов с различными амплитудами смещения. Превышение хребтов над прогибами, где в геологическом строении участвуют домезазойский фундамент и мезо-кайнозойский покров, колеблется от 200–600 м до 2200–3000 м. Первый сложен вулканогенными и осадочными, магматическими и метаморфическими породами, а второй – морскими и континентальными осадками. В

горных массивах, большей частью развиты пресные и ультрапресные воды с расходами от десятых долей до сотен л/с, а также эпизодически известны источники с температурами вод от 20 °С до 60 °С. Что касается мезо-кайнозойского чехла в межгорных впадинах, то практически повсеместно вскрыты высокотемпературные воды с минерализацией от 1.0 до 230 г/л. Это – результат обновления древних и появления молодых разрывов в новейшее время, сформировавших благоприятные условия для движения подземных вод сверху-вниз и, наоборот, подъема снизу-вверх глубинных флюидов, о чем свидетельствует близость набора и количественных содержаний микрокомпонентов в водах осадочного чехла и фундамента.

Условия формирования термальных вод региона рассмотрены на примерах отдельных месторождений (Кендирбаева 2017). При этом обсуждаемой является проблема увеличения количества привлекаемых параметров, но их генезис остается нерассмотренным. С нашей позиции, сложность решения этой проблемы заключается именно в недостаточности знаний о функциональных связях между геолого-тектоническим строением структур и режимом существования водоносных комплексов, в связи с чем для объективной их оценки на фоне широкого спектра физико-химических параметров необходимо изучить изотопный состав –  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  самого растворителя ( $H_2O$ ) при совмещении с факторным анализом.

### **Методика исследований**

Основными параметрами послужили концентрации дейтерия ( $\delta D$ ) и кислорода ( $\delta^{18}O$ ), свободного и растворенного  $H_2S$ ,  $O_2$  и  $CO_2$ ,  $Vg$  и  $I$ , а также содержания гелия ( $He$ ), фтора и кремния, включая значения  $pH$  и  $Eh$  во всех типах природных вод региона. Анализ этих параметров основывается на статистических приемах и учете преобладающих факторов. С помощью первого определяется степень корреляции между параметрами, а второй выделяет среди главного фактора множества признаков (Имашев и др. 2018).

### **Анализ и обсуждение результатов**

Рассмотрены площадные и вертикальные гидрогеохимические закономерности терм, связанные с неоднородностями внутреннего строения земной коры, а основные источники питания установлены сопоставлением с данными поверхностных и неглубокозалегающих вод. Для этого на рис. 1 представлена схема месторождений Баткенской впадины, расположенной на границе Кыргызстана и Таджикистана, в состав каждого из которых входят от 5–6 до 10 скважин, пробуренных до глубин 5–7 км. По ним получена многочисленная ценная информация, начиная от неоген-четвертичных отложений кончая породами фундамента, особенно, сведения о поинтервальном гидрогеохимическом опробовании.

Географическое положение выходов геотермальных вод, привязанное к абсолютной высоте местности и гидрографической сети, обусловили проявление их основных физико-химических особенностей (Кендирбаева 2020). В качестве примера можно привести все регионы Кыргызского Тянь-Шаня. Например, как одиночные, так и групповые родники в Северном Тянь-Шане сосредоточены от 2200 до 2500–2600 м, в Срединном с наибольшим поднятием рельефа таковые зафиксированы на 2600–2800 м, а в Южном – от 2200 до 2800 м.

Их выходы и температура, включая химический состав по отношению к речной сети, также соответствуют выявленным площадным закономерностям: групповые и очаговые источники холодных (долины р. Яссы), а также теплых вод площадного развития связаны с отложениями пойм и первой надпойменной террасы, а в кристаллических трещинах, отдаленных от русел на 100–150 и более метров известны очаговые родники с щелочными термами сульфатно-хлоридного и хлоридно-сульфатного натриевого состава. Подобные различия в местах их разгрузки объясняем участием поверхностных вод. Об этом подтверждают и содержания дейтерия и  $O^{18}$ , варьирующие от –110 до –140 и от –13,0 до –17,5 ‰ соответственно, за исключением некоторых участков, где  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  составляют –95 и 5,7‰. В целом их низкие концентрации весьма близки таковым в водах четвертичных отложений изучаемого региона (табл.1).

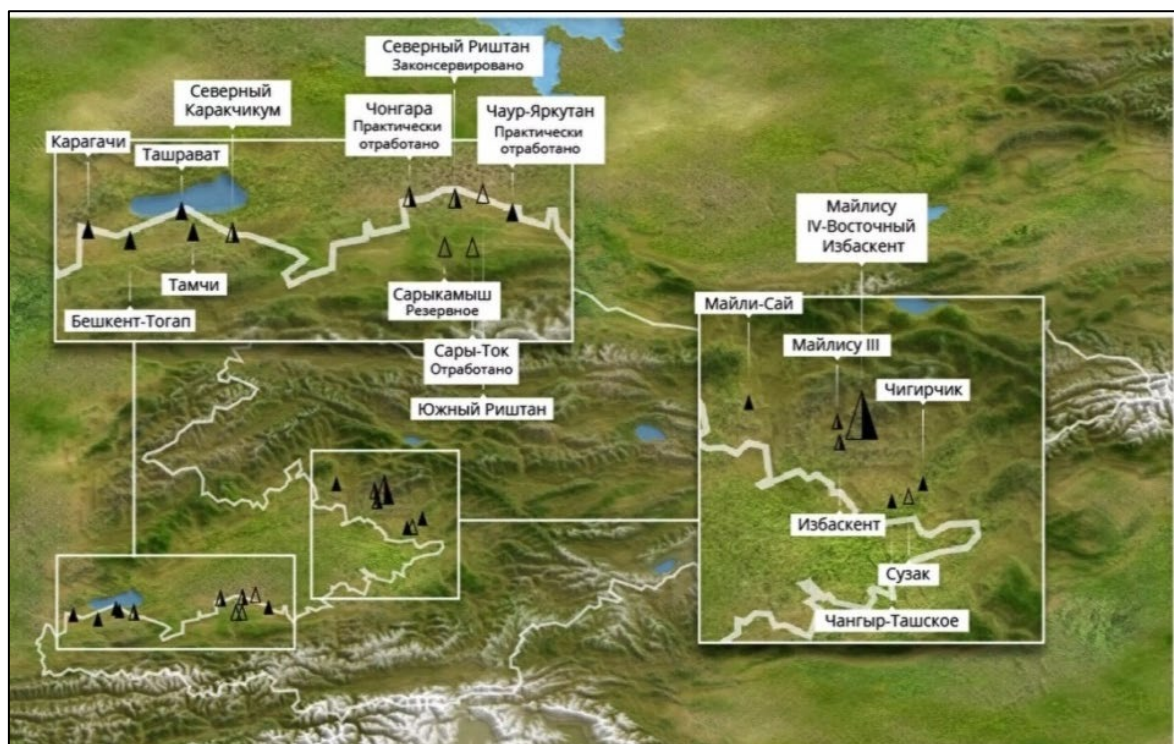


Рисунок 1 – Схема расположения месторождений термальных вод Баткенской впадины

Таблица 1. Характеристика геотермальных вод Кыргызского Тянь-Шаня

Типы гидрогеологических структур	Водовмещающие породы и геологический возраст	T °C	Мг/л	Химический состав, мг-экв.-%	Название водопунктов
Гидрогеологические массивы	Каледонские гранитные интрузии и метаморфические сланцы	32–50,5	0,25–0,3	$\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{Cl}$ (Na+K)Ca $\text{SO}_4\text{Cl}$ (Na+K)Ca	Тескейская гидротермальная линия, Иссык-Ата, Аламедин, Кара-Балта
Межгорные артезианские бассейны	Песчаники, конгломераты, брекчии и паттумы неогена	30–48	0,25–0,8	$\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{Cl}$ (Na+K)Ca $\text{SO}_4\text{Cl}$ (Na+K)Ca	Учкайнар, Джергалан, Каджи-Сай, Бишкек, Курское и др.

В вертикальном разрезе выделены три структурно-гидрогеологических этажа, отличающиеся источником питания, областями распространения и разгрузки вод (Кендирбаева 2020). Так, для нижнего и среднего этажей характерно следующее:

- пьезометрические уровни нижнего этажа устанавливаются выше среднего этажа, причем их разница колеблется от нескольких до десятков метров;
- пьезометрические уровни среднего этажа устанавливаются с небольшой разницей выше пьезометрических уровней нижнего, причем нередко они совпадают.

Итак, независимо от глубины циркуляции и литологической представленности вмещающей среды, сказанное выше находится в определенной взаимосвязи с минерализацией и химическим составом – в виде обратной, прямой и пульсирующей гидрогеохимической зональности: с первым типом связана в конечном итоге смена соленых разновидностей на самоизливающиеся пресные воды, со вторым достижение наибольших значений в нижней части за счет постепенного повышения параметров книзу, тогда как поведение третьей позволяет выделить как самостоятельный тип, который можно назвать «мигающим». В этом случае, как видно из рис. 2, измеряемые параметры варьируются в

широком диапазоне. В них, судя по концентрационным значениям, такие зигзагообразные вариации не укладываются в рамки прямой и обратной зональностей. Дело в том, что они постоянно испытывают мигающие пульсации разной интенсивности, но их наибольшее отклонение от средних значений в любую сторону совпадает с определенными этапами геологического развития структур. Это четко видно из геолого-гидрохимического разреза скважины Майлуу-Суу, когда максимум компонентов прослеживается в периоды палеоген-неогена и мела, когда в Кыргызском Тянь-Шане активизировались тектонические движения.

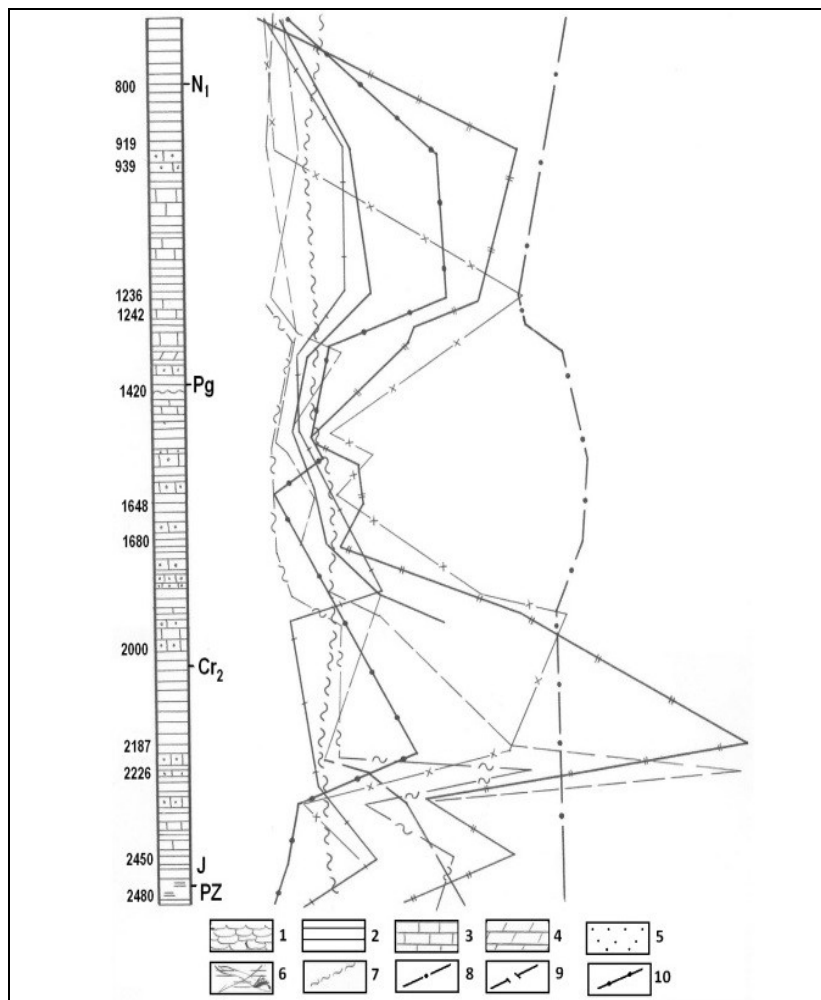


Рисунок 2 – Геолого-гидрохимический разрез скважины Майлуу-Суу:

- 1 – конгломераты; 2– глины; 3 – известняки; 4 – мергели;  
5 – песчаники, 6 – складки 7– сульфаты; 8 – хлориды;  
9 – температура; 10 – азот

Термальные воды Кыргызского Тянь-Шаня являются единственным проявлением неотектонической геотермальной деятельности земной коры, продолжающейся по настоящее время. Так, их общими чертами являются приуроченность к разломам, сформированным в геомеханических условиях растяжения, а также преобладание в катионном составе натрия, в анионном –  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  и  $\text{Cl}$ . При этом в термах с минерализацией до 0,5 г/л глубинных разломов неотектонического смещения 6–8 км и максимальной крутизны углов падения ( $75\text{--}85^\circ$ ) обнаружены высокие содержания  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  (Аксу, Алтын-Арашан, Кожешкен, Арча-Баши), а источники в зонах 2–4 км, характеризуются  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  как в реках.

Дело в том, что неотектонический этап, интегрируя всю историю развития Кыргызского Тянь-Шаня (Кендирбаева, 2021), сформировал современные структуры и создал условия для внедрения газо-водяных флюидов, а также для проникновения поверхностных вод на глубины, достаточные для нагрева. В качестве примера приведем три групповых выхода ТМВ Алтын-Арашан:

– северная группа, выходящая вблизи русла р. Арашан, выклинивается на высоте 1900–2000 м с  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl- Na-Ca}$  составом, имея 33–35,5 °С, рН – от 7,8 до 8,0, а Eh – от +200 +150 мВ;

– средняя группа, тяготеющая к высотам 2200–2300 м и сосредоточенная на площади 200–250 м<sup>2</sup>, ей свойственны  $\text{Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$  Na состав и высокая температура (50–50,5 °С), щелочная среда (рН = 9,0–9,5), Eh – от 0 до +100 мВ;

– южная группа на высоте 2800 м, удаленная (300–400 м) от одноименной реки, характеризуется температурой +56,5 °С и  $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$  составом.

### **Выводы**

Рассмотрены условия формирования геотермальных вод изучаемого региона посредством сопоставления физико-химических параметров с тектонической обстановкой. Поскольку геотермальные воды связаны с определенными геологическими образованиями, то рассматривается теория о пульсирующем дыхании Земли, а определяющими его параметрами являются  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ , учитывая единство природных вод. Термальные воды региона, являясь единственным проявлением неотектонической деятельности земной коры, продолжающейся по настоящее время, подчиняются прямой, обратной и пульсирующей зональности, а их генезис относится к седиментационным, эндогенным и инфильтрационно-эндогенным составляющим соответственно.

### **Список литературы**

1. Кендирбаева Дж. Ж., Гребенникова В.В. / О взаимосвязи геотермических условий и геохимической обстановки Кыргызского Тянь-Шаня / Дж.Ж. Кендирбаева. В.В. Гребенникова // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле и интерпретация геофизических полей. Екатеринбург. 2014. С. 145–147.

2. Кендирбаева Дж. Ж. К дискретности гидрогеологических условий в свете разрывно-блоковой делимости Кыргызского Тянь-Шаня / Дж.Ж. Кендирбаева // Материалы Всероссийской конференции Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле и интерпретация геофизических полей. Екатеринбург. 2017. С. 206–210.

3. Имашев С.А., Дж. Ж. Кендирбаева., Свердлик Л.Г. Алгоритм и технологии программного обеспечения «GEOCHEMISTRY» / С.А. Имашев, Дж.Ж. Кендирбаева, Л.Г. Свердлик // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. Бишкек. 2018. С. 164–169.

4. Кендирбаева Дж.Ж. Новые данные об особенностях газо-химического состава и температуры термальных вод Кыргызского Тянь-Шаня (на примере термальных вод Джеты-Огуз) / Дж.Ж. Кендирбаева // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология и геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop, 2020). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 75–78.

5. Кендирбаева Дж.Ж. Современные гидротермальные системы и флюидная дегазация Кыргызского Тянь-Шаня / Дж.Ж. Кендирбаева // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология и геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop, 2021). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 55–58.

## **Флюидные системы Камчатки - перспективная ресурсная база развития геотермальной энергетики с позиций концепции онтогении гидротермального процесса**

**И.Ф. Делемень, Г.А. Карпов**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
delemen@kscnet.ru*

На базе концепции онтогении гидротермального процесса рассмотрены перспективы использования водных геотермальных источников энергии для расширения ресурсного энергетического потенциала Камчатского края. Основное внимание уделено рассмотрению высокотемпературных гидротермальных систем. Сделан вывод, что дальнейшее наращивание ресурсов таких систем должно идти по пути вовлечения в использование околокритических и надкритических гидротермальных флюидов, а также создания техногенных гидротермальных геосистем в сухих горячих породах. В заключении выполнен краткий критический обзор перспектив развития «зеленой энергетики» в рассматриваемом регионе в свете определяющей роли водно-парогазовых флюидов в процессах энергопереноса в его недрах.

**Ключевые слова:** вода, вулканизм, гидротермы, Камчатка, онтогения, флюид, энергетика

## **Fluid Systems of Kamchatka Promising Resource Base for the Development of Geothermal Energy from the notion of the Concept of Ontogeny of the Hydrothermal Process**

**Ivan Delemen, Gennady Karpov**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

On the basis of the concept of ontogeny of the hydrothermal process, the prospects of using water geothermal sources of energy to expand the resource energy potential of the Kamchatka Territory are considered. The main attention is paid to the consideration of high-temperature hydrothermal systems. It is concluded that the further increase in the resources of such systems should go along the path of involving the resources of near-critical and supercritical hydrothermal fluids and the creation of technogenic hydrothermal geosystems in dry hot rocks. In conclusion, a brief critical review of the prospects for the development of «green energetics» in the region under consideration is carried out in the light of the decisive role of water and other fluids in the processes of energy and mass transfer in its depths.

**Keywords:** water, volcanism, hydrotherms, Kamchatka, ontogeny, fluid, energy

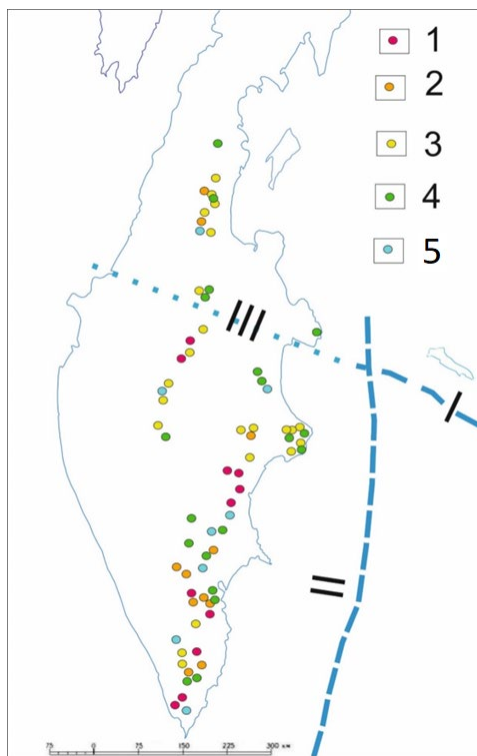
### **Введение**

Месторождения термальных вод являются важной составляющей энергетической обеспеченности и безопасности Камчатского края. Как правило, геотермальные месторождения занимают центральные части гидротермальных систем (ГТС), где геоизотермы формируют термальный купол. Границы месторождений, т.е. тех участков ГТС, которые эксплуатируются или могут использоваться. Так, границами Паужетского месторождения парогидротерм считается контур многогранника, образованного скважинами, наиболее удаленными от восходящего потока теплоносителя в гидротермальном резервуаре.

Запасы теплоносителя на гидротермальных месторождениях (ГМ) определяются параметрами, значения которых зависят от условий формирования и развития (онтогении) гидротермальных процессов (ГП) и систем. Важно учитывать характеристики источников водного и теплового питания и структуру проницаемости гидротермального резервуара, а также подстилающих его (бедрок) и перекрывающих (кепрок) водоупоров. В таком понимании гидротермальная система – естественная конвективная водная система в недрах

планеты, тепломассоперенос в которой осуществляется при наличии источников и стоков тепла и воды в различных ее фазах. На Камчатке расположены десятки ГМ (Рис. 1).

В основу разработки и тиражирования современных инновационных методов прогноза, поиска и разведки геотермальных ресурсов нами предлагается положить принципы, разработанные Г.А. Карповым и В.А. Ильиным в концепции онтогении ГП (2).



*Рисунок 1 – Пространственное положение геотермальных месторождений и систем Камчатки. Геотермальные месторождения эксплуатируемые и разведанные – 1, прочие геотермальные системы: эксплуатируемые – 2, с оцененными запасами – 3, перспективные для разведки – 4, мало изученные – 5. На карте обозначены: I – Алеутский жёлоб, II – Курило-Камчатский жёлоб, III – поперечная трансформная зона тектонических дислокаций на продолжении Алеутского желоба*

С учетом новейших данных авторами предлагается модифицированная концепция онтогении геотермальных систем Камчатки.

### **Местоположение и параметры источников водного питания**

Выявление местоположения и параметров источников водного питания гидротермальных систем чрезвычайно важно для оценки энергетического потенциала месторождений, так как они определяют продуктивность гидротермальных резервуаров. На Земле вода современной гидросферы является следствием чрезвычайно длительного развития водной геоболочки (вследствие взаимодействия многих внешних и внутренних факторов эволюции ее), и предопределяет развитие многих геологических процессов. Для изучения источников водного питания гидротермальных систем особая роль принадлежит изучению изотопной геохимии водорода и кислорода. После публикации в 1961 году Х. Крейгом его исследований изотопного состава метеорных вод, у гидрогеологов появился соблазн определять местоположение источников водного питания на основании только изотопных данных о составе теплоносителя с определением высотного положения области водного питания. Между тем, при изучении водного питания гидротермальных систем необходимо учитывать возможность формирования наблюдаемого изотопного состава воды в результате взаимодействий вода-порода в гидротермальном резервуаре и при испарении в недрах системы. На наш взгляд, изотопные исследования водного питания ГТС обязательно

следует сочетать с традиционными методами изучения гидрогеологии и водного режима вулканогенов и ГТС. Запасы термальных вод в значительной мере определяются проницаемостью пластовых коллекторов и иных зон повышенной пористости или трещиноватости в геотермальных резервуарах (4).

### **Проницаемость**

Проницаемость в резервуарах ГТС определяется тектонической обстановкой (6), а также естественным гидравлическим разрывом пластов на участках повышенного флюидного давления в них (3). Следует также учитывать структуру проницаемости резервуаров в таких системах гидротермально-магматического (5, 7) и кальдерного (8) типов. Дальнейшее развитие методов оценки условий теплопереноса за пределами подтвержденных скважинами глубин следует дополнять численно-концептуальными данными количественной интерпретации геолого-геофизических, геолого-геологических и геотопологических съемок и иных исследований на основе концепции онтогении гидротермального процесса (2).

При рассмотрении источников теплового питания ГТС (помимо рассмотрения моделей с участием резервуаров магмы), необходим учет альтернативных моделей, - потоков метаморфогенных и трансмантийных (интрателлурических) флюидов, а также коровых систем надкритических и околокритических водных растворов и т.д.

### **Тепловое питание**

Тепловое питание гидротермальных систем объясняется обычно нагревом подземных вод магматическими массами, локализованных в недрах планеты в виде резервуаров магмы, магматических очагов и скоплений даек или силлов. Нередко источником нагрева термальных вод (особенно в зонах глубинных разломов) считают повышенный региональный кондуктивный тепловой поток. Продолжает развиваться и предложенная в 60-х годах прошлого века В.В. Аверьевым концепция нагрева подземных вод «эндогенным паром». В настоящее время его концепция нашла выражение в теории теплового питания гидротермальных систем надкритическими флюидами, циркулирующими в недрах земной коры. В реальных условиях реализуются различные механизмы теплового питания.

### **Обсуждение результатов**

К сожалению, до сих пор степень насыщенности флюидами оболочек Земли остается одним из самых спорных вопросов геологии. Какова роль астеносферы в переносе летучих флюидов к поверхности Земли? Неоспоримым является только то, что в астеносфере расположены преимущественно источники магм основного состава, надкритические флюиды по геофизическим данным сосредоточены в земной коре на глубинах  $\geq 20-30$  км, а в магматических очагах происходит термическая диссоциация  $H_2O$  на составляющие. Каким образом происходит образование именно жидкой воды, или её паровой фазы? На эти вопросы пока нет ответа. На наш взгляд, современные геофизические исследования подтверждают опубликованную в 1971 году С.М. Григорьевым (1) гипотезу «дренажной оболочки земной коры». На глубинных уровнях коры с температурами от 374 до 450 °С в коре происходит переход жидкой и парообразной фаз воды в фазовое состояние надкритического флюида. По мнению С.М. Григорьева, ниже изотермы 374 °С такой флюид конденсируется, растворы опускаются вниз, на уровни, где температура выше критической точки воды, и опять превращаются в восходящий поток надкритического флюида.

Несколько иная ситуация возникает в магмо-гидротермальных системах, в которых выходу флюидов из магматического очага препятствует пластическая оболочка, сформировавшаяся в результате нагрева вмещающих пород магмой. Смещения таких флюидов с подземными водами не происходит, поэтому магматогенная составляющая в изотопном составе современных термальных вод весьма невелика. Источником теплового питания термальных вод в таких обстановках является суперконвективная надкритическая флюидная система, сформированная нагревом глубинных подземных вод тепловым полем очага при температурах, превышающих критическую точку воды.



Для расширения ресурсной базы месторождений термальных вод важным является понимание высокой агрессивности надкритических флюидов по отношению не только к металлам, но и горным породам. Минеральная масса вдоль стенок тончайших трещин, пор и полостей, интенсивно растворяется и выносится надкритическим флюидом, резко увеличивая проницаемость среды. Таким образом, возникновение условий для формирования надкритических флюидов на определенных стадиях онтогенеза ГТС, является важнейшим фактором увеличения природного ресурсного потенциала геотермальных систем.

Вторым важным фактором является развитие в процессе эволюции ГТС термодинамических и иных барьеров различных типов. В их формировании велика роль надвиговой тектоники, что важно для поиска новых высокотемпературных гидротермальных резервуаров. Необходимо также расширение и развитие прикладных аспектов стратегий «зеленой энергетики», особенно прогноза и поисков естественных потоков и залежей молекулярного водорода в недрах Камчатки. Для Камчатки может быть полезен также опыт материкового Китая по поиску путей максимизации прибылей от использования термальных ресурсов за счет диверсификации путей их экономического использования.

### **Основные выводы**

Концепция онтогении гидротермального процесса может служить теоретической основой разработки перспектив использования водных геотермальных источников энергии для расширения ресурсного энергетического потенциала Камчатского края. Дальнейшее наращивание ресурсов таких систем должно идти по пути учета околокритических и надкритических режимов теплопереноса гидротермальных флюидов в земной коре, в том числе путем создания техногенных гидротермальных геосистем в сухих горячих породах. Необходим пересмотр стратегий использования геотермальной энергетики в сторону разработки технологий низкоэнталийных термальных вод, и тепловых насосов, а также создания околокритических систем искусственной циркуляции в недрах вулканических сооружений и в тектонически активных зонах. Наращивание запасов высокотемпературных термальных вод возможно путем поиска более глубоких коллекторов парогидротерм, а также повышения их проницаемости техническими методами.

### **Список литературы**

1. *Григорьев С.М.* Роль воды в образовании земной коры (Дренажная оболочка земной коры) / *С.М. Григорьев.* Москва: Недра, 1971. 264 с.
2. *Карнов Г.А.* Онтогения гидротермального процесса (происхождение и развитие) / *Г.А. Карнов, В.А. Ильин.* Владивосток: Дальнаука, 2006. 159 с.
3. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А.В. Кирюхин.* Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
4. *Кирюхин А.В.* Гидрогеология вулканогенов / *А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин.* Санкт-Петербург: Наука, 2010. 304 с.
5. *Рычагов С.Н.* Гидротермально-магматические системы островных дуг: структура и этапы развития / *С.Н. Рычагов* // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма (Материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля – 6 августа 2005 г.). Петропавловск-Камчатский: Оттиск, 2005. С. 117–v140.
6. *Christoph A.H.* Hydrothermal systems / *A.H. Christoph, R.W. Henley.* Australian Mineral Foundation. 1989. 74 p.
7. *Masotta M.* Crustal Magmatic System Evolution: Anatomy, Architecture, and Physico-Chemical Processes / *M. Masotta, C. Beier, S. Mollo* John Wiley & Sons. 2021. 256 p.
8. Physical results of research drilling in thermal areas of Yellowstone National Park, Wyoming / *Donald E. White, R.O. Fournier, L.J.P. Muffler, and A.H. Truesdell* Wash. (D.C.): Gov. Print. off. 1975. 70 p.

## TOUGH2 и iTOUGH2 моделирование водно-метанового месторождения

А.С. Байрамова

*Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт Наук о Земле, г. Санкт-Петербург, Россия  
aynurbayramowa1610@mail.ru*

Обоснована концептуальная гидродинамическая модель резервуара. Анализ эксплуатации одиночной вертикальной скважины выполнен с использованием графического препроцессора PetraSim, прямого и инверсионного iTOUGH2- EWASG моделирования.

**Ключевые слова:** PetraSim, моделирование, двойная пористость, TOUGH2, iTOUGH2, EWASG

## TOUGH2 and iTOUGH2 modeling of a water-methane field

Aynur Bayramova

*Saint Petersburg State University, Institute of Earth sciences, Saint Petersburg, Russia*

The conceptual hydrodynamic model of the reservoir. A single vertical well production analysis was performed using the PetraSim graphical preprocessor, forward and inverse iTOUGH2-EWASG simulation.

**Keywords:** PetraSim, modeling, double porosity, TOUGH2, iTOUGH2, EWASG

### Концептуальная модель

В качестве концептуальной модели продуктивного резервуара рассматривается система горизонтальных продуктивных трещин (в среднем вскрывается по 2 продуктивных зоны) с суммарной вертикальной мощностью 17 м внутри толщи Келловей-оксфордского яруса (J3k-o) с общей мощностью 50 м. Указанная ситуация геометрически может соответствовать эксплуатации одиночной добычной скважины резервуара в условиях радиально-цилиндрического потока с вертикальной неоднородностью резервуара, включающего более проницаемые, продуктивные, субгоризонтальные зоны.

При генерации вычислительной сетки применяется опция MINC двойной пористости (Double porosity) с параметрами: Fracture Spacing (расстояние между трещинами) 25 м, т.к. фиксируется 2 трещины с суммарной вертикальной мощностью 17 м на 50 м резервуара. FF – Fracture Fraction (объемная доля «трещин» составляет 0,33) – разбиение элементов модели по схеме с двойной пористостью, как приведено на рис. 1.

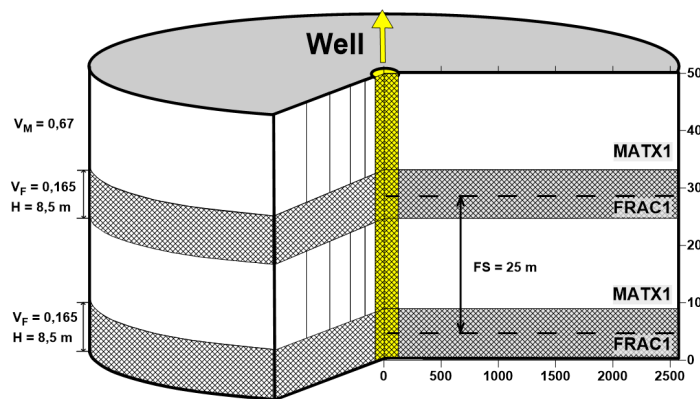


Рисунок 1 – Определение параметров схемы «двойной пористости». Две трещины мощностью по 8,5 м каждая на расстоянии 25 м друг от друга

Максимальный шаг по времени (DT) 1 день, время моделирования с 29.07.2015 г. до 29.02.2020 г., т.е. 4 года и 7 месяцев.

Выполнено моделирование с целью воспроизведения на модели истории обводнения при эксплуатации скважин М-21, М-22, М-23, при этом в качестве калибровочного параметра использовано начальное газонасыщение  $S_g$ . Варианты моделирования отображены в табл. 1– 3.

Таблица 1. Варианты моделирования истории эксплуатаций месторождения (М-21)

Вариант моделирования	Добычная скважина	$k_m$	$k_f$	$S_g$
Dp#1	$Q=const$	1E-13	1E-9	0,5
Dp#2	$PI=1E-13 \text{ m}^3$ $Pb=1E7 \text{ Pa}$	6E-14	1E-12	0,5
Dp#3	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,5
Dp#4	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,4
Dp#5	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,45
Dp#6	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,43
Dp#7	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,44

Таблица 2. Варианты моделирования истории эксплуатаций месторождения (М-22)

Вариант моделирования	Добычная скважина	$k_m$	$k_f$	$S_g$
M22-Dp#1	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,44
M22-Dp#2	$Q(t)$	6E-14	1E-12	0,45
M22-Dp#3	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,48
M22-Dp#4	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,47

Таблица 3. Варианты моделирования истории эксплуатаций месторождения (М-23)

Вариант моделирования	Добычная скважина	$k_m$	$k_f$	$S_g$
M23-Dp#1	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,47
M23-Dp#2	$Q(t)$	6E-14	1E-12	0,44
M23-Dp#3	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,43
M23-Dp#4	$Q(t)$	6E-14	1E-13	0,40

### Результаты моделирования

Сопоставление результатов моделирования с фактическими данными по истории эксплуатации показаны на рис. 2–4. Наиболее близкими вариантами построенных моделей к истории обводнения при эксплуатации являются: для скважины М-21 – вариант Dp#7, для М-22 – вариант M22-Dp#4, для М-23 – M23-Dp#4.

Таким образом, начальные газонасыщения  $S_g$  оцениваются для добычных скважин следующим образом: для М-21  $S_g = 0,44$ , для М-22  $S_g = 0,47$ , для М-23  $S_g = 0,40$ .

Указанная процедура оценивания оказалась весьма времязатратной (около 5 месяцев), поэтому было принято решение применить инверсионное моделирование.

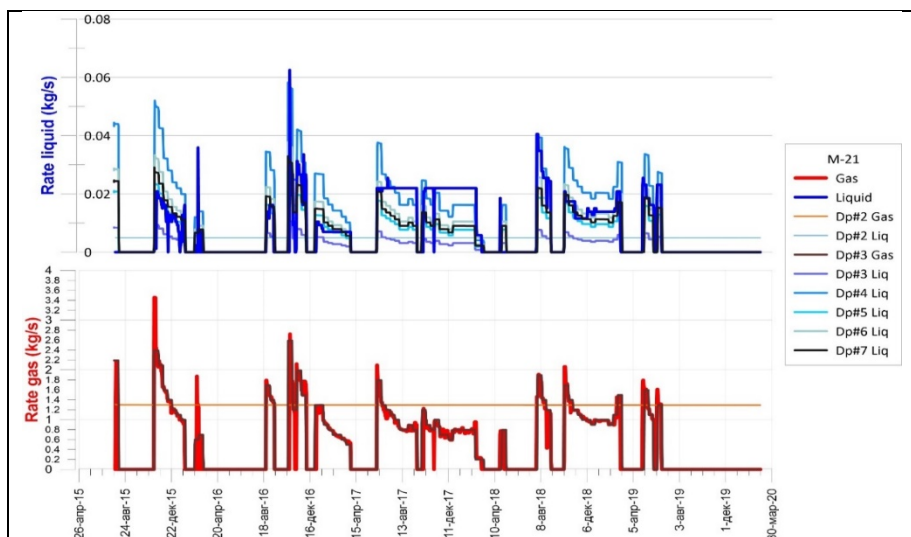


Рисунок 2 – Графики с результатами моделирования истории эксплуатации водно-метанового месторождения (скважина Мет-21)

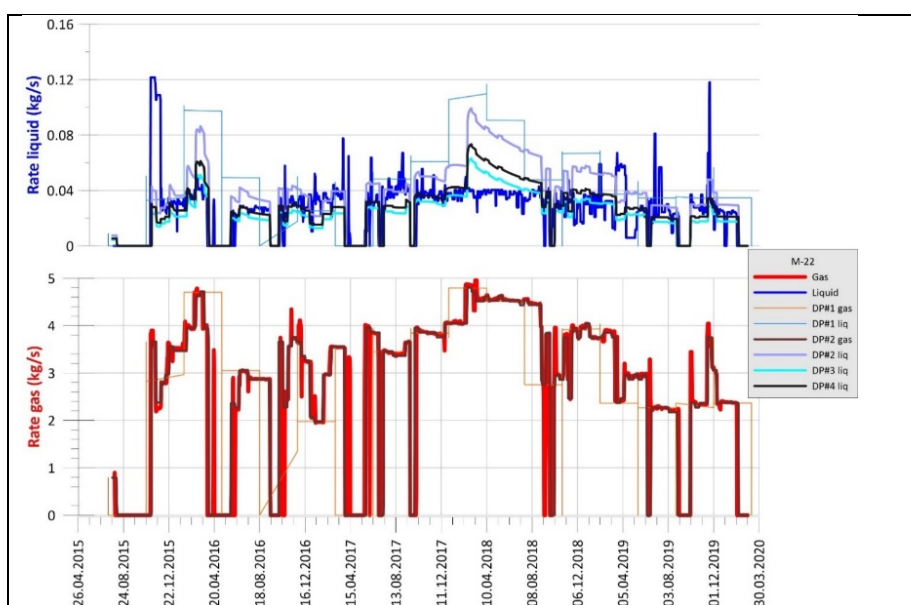


Рисунок 3 – Графики с результатами моделирования истории эксплуатации водно-метанового месторождения (скважина Мет-22)

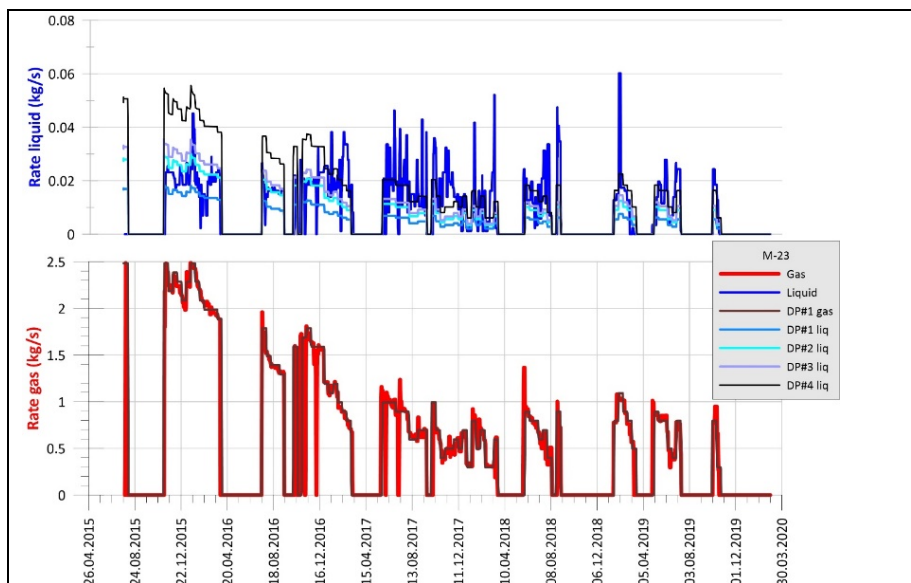


Рисунок 4 – Графики с результатами моделирования истории эксплуатации водно-метанового месторождения (скважина Мет-23)

### Инверсионное iTOUGH2-EWASG-моделирование (R-Z модель)

Применение инверсионного моделирования позволяет выполнить калибровку модели в автоматическом режиме, что существенно сокращает затраты времени по сравнению с

методом «подбора» калибровочных параметров («trial and error method») и открывает возможности для многопараметрического моделирования.

iTOUGH2 решает обратную задачу путем автоматической калибровки модели TOUGH2 по наблюдаемым данным. Любой исходный параметр TOUGH2 может оцениваться по данным наблюдений, соответствующих результатам TOUGH2 моделирования. Целевая функция (OF, object function) оценивает отклонение между вычислением модели и наблюдаемыми данными, а алгоритм минимизации предлагает новые наборы параметров, которые итеративно улучшают соответствие. Как только определен набор параметров наилучшей оценки, iTOUGH2 выполняет обширный анализ ошибок, который предоставляет статистическую информацию об остатках, неопределенностях оценки и способности различать альтернативы модели. Кроме того, анализ распространения неопределенности позволяет количественно оценить ошибки прогнозирования.

### Исходные файлы для iTOUGH2-EWASG моделирования

Файл Input содержит численное описание модели, изложенной выше в текстовом формате программы TOUGH2 (Pruess et al, 1999, Appendix E).

Файл iT2 содержит команды, написанные на языке высокого уровня, предназначенные для осуществления процесса инверсионного моделирования (Finsterle S., 2014).

В том числе, в блоке Parameter определяется, что в качестве оцениваемых параметров рассматривались два: начальное насыщение газовой фазы  $S_g$  и сжимаемость матричного континуума  $C$  (Па-1) (рис. 5).

```
> PARAMETER

>> INITIAL condition for primary variable No.: 3
>>> MATERIAL      : FRAC1
>>>> ANNOTATION  : SG FRAC1
>>>> VALUE
>>>> initial GUESS : 10.4
>>>> admissible RANGE: 10.01 10.99
>>>> VARIATION   : 0.01
>>>> STEP        : 0.01
<<<<
<<<

>> COMPRESSIBILITY
>>> MATERIAL      : MATX1
>>>> ANNOTATION  : COM-MATX1
>>>> LOGARITHM
>>>> VALUE
>>>> RANGE       : -8.0 -4.8
>>>> VARIATION   : 0.2
>>>> STEP        : 0.2
<<<<
<<<<
```

Рисунок 5 – Оцениваемые параметры iT2 модели

### Результаты iTOUGH2-EWASG моделирования

Расчетные невязки результатов моделирования с наблюдаемыми значениями по обводнению скважины показаны на рис. 6.

Начальное значение целевой функции (Initial value of objective function): 1,5562E-02, C.O.F (Relative contribution to final objective function) = 186,43 %

Полученное в результате моделирования значение целевой функции (Minimum value of objective function): 8,3474E-03, C.O.F = 100,00 %.

Чувствительность модели рассчитывается с помощью нормированной матрицы чувствительности, каждый из элементов которой определяется как частная производная расчетного отклика системы (обводнение) к оцениваемому параметру. Анализ чувствительности модели по отношению к оцениваемым параметрам показывает значения 0,2 для  $S_g$  и 0,9 для  $C$ . Корреляционный анализ показывает отсутствие зависимости оцениваемых параметров.

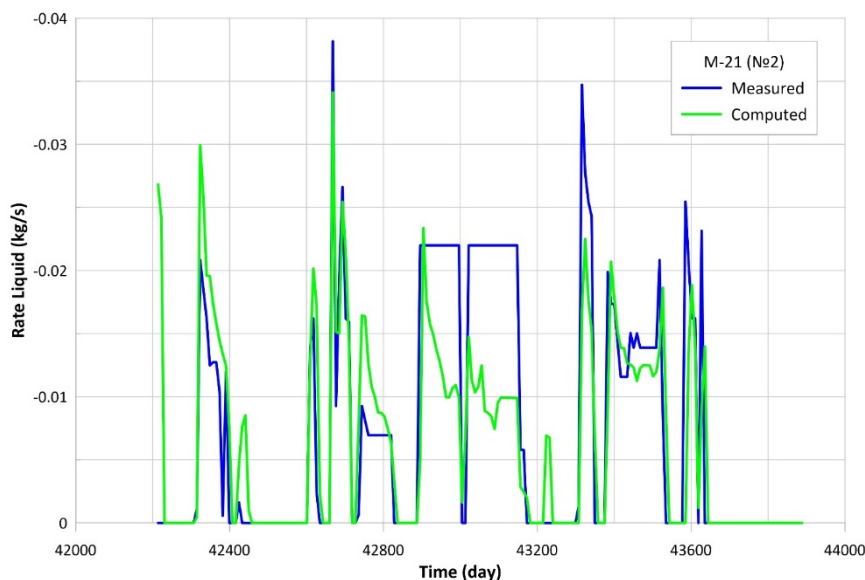


Рисунок 6 – График с результатами iT2 моделирования истории эксплуатации водно-метанового месторождения

В результате получены оценки начального газонасыщения  $S_g = 0,434$  (с погрешностью  $\sigma = 0,003$ ) и сжимаемости  $C = 9,988 \times 10^{-6}$  Па<sup>-1</sup> (с погрешностью  $\sigma = 0,45\%$  от абсолютного значения  $C$ ), при этом начальные невязки модели с фактическими данными снизились на 86% (скв. М-21).

*Автор выражает благодарность Кирюхину А. В. за консультации по численному моделированию.*

### Список литературы

1. Кирюхин В.А. Региональная гидрогеология: учебное пособие. СПб: СПГУ, 2005. 344 с.
2. Кирюхин П.А., Кирюхин А.В. Frac-Digger. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612168 от 21.06.2016.
3. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / А.В. Кирюхин // СПб.: Эко-Вектор, 2020. 431 с.
4. Pruess K. A practical method for modeling fluid and heat flow in fractured porous media / K. Pruess, T.N. Narasimhan // Society of Petroleum Engineers Journal. 1985. № 25, P. 14–26.
5. Pruess K. TOUGH2 user's guide, Version 2.0. Rep. LBNL-43134 / K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridi. Berkeley, California; Lawrence Berkeley Natl. Lab, 1999.
6. Finsterle S. iTOUGH2 V7.0 Command Reference. Rep. LBNL-40041 rev. / S. Finsterle. Berkeley, California; Lawrence Berkeley Natl. Lab, 2014.

Научное издание

**Материалы всероссийской научной конференции с международным участием  
«Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа»  
(Geothermal Volcanology Workshop 2022)  
29 августа – 3 сентября 2022 г.**

**Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation  
«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology»  
(Geothermal Volcanology Workshop 2022),  
August 29 – September 3, 2022**

Подписано к печати \_\_.10.2022

Формат 60x84/8

Бумага типографская

Усл.-печ. л. 19.75

Тираж 23 экз.

Заказ № 30306

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в ИВиС ДВО РАН,  
в ООО «ФОН», 683024, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Владивостокская д. 37