



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии

Дальневосточное отделение

Российская академия наук

# PROCEEDINGS

## Second

# Geothermal Volcanology

# Workshop 2018

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,  
Petropavlovsk-Kamchatskiy  
September 5-8, 2018



ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ

2018



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии

Дальневосточное отделение

Российская академия наук

# II Международное научное совещание по проблемам геотермальной вулканологии 5-8 сентября 2018 г.

## Материалы конференции



ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ

2018

УДК 550.36+550.348.098.64+551.21

Научное издание

**Material II Geothermal Volcanology Workshop 2018, 05 - 08 September, 2018** – Petropavlovsk Kamchatsky, Russia: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2018. – 100 p.

**Материалы II Международного научного совещания по проблемам геотермальной вулканологии, 5-8 сентября 2018 г.** – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. – 100 с.

ISBN 978-5-902424-22-2

This compilation presents materials of the 2-nd international seminar on geothermal volcanology (Geothermal Volcanology Workshop 2018) was held in Petropavlovsk-Kamchatsky in 2018 by Institute of Volcanology & Seismology FEB RAS. The results of geological and geophysical studies of areas of modern volcanism and hydrothermal systems are given.

В сборнике представлены материалы II международного научного совещания по проблемам геотермальной вулканологии, проводимого Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в 2018 г. Освещаются результаты геологических и геофизических исследований районов современного вулканизма и гидротермальных систем.

Утверждено к печати  
Ученым советом  
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

*Редакционная коллегия:*  
академик РАН Е.И. Гордеев, академик РАН С.А. Федотов, д.г.-м.н. А.В. Кирюхин,  
д.г.-м.н. А.И. Кожурин

*Отв. редактор:*  
д.г.-м.н. А.В. Кирюхин

*Ответственные секретари:*  
О.А. Гололобова, Е.В. Черных

ISBN978-5-902424-22-2

© ИВиСДВОРАН, 2018

## Table of Contents

Alexey V. Kiryukhin

Introduction to Geothermal Volcanology Workshop 2018, Technical Program and Fieldtrips.... 8

### SECTION I. HYDROTHERMAL SYSTEMS ADJACENT TO ACTIVE AND EXTINCT VOLCANOES

*Antonina G. Nikolaeva, Gennady A. Karpov*

Underwater hydrotherms in the Karymskoye caldera lake (Eastern Kamchatka)..... 16

*Natalia A. Malik*

Temperature and gas composition of the Avachinsky volcano fumaroles (Kamchatka) in 2013-2018  
..... 21

*Alexey V. Kiryukhin, Pavel O. Voronin, Nikita B. Zhuravlev, Andrey Y. Polyakov, Tatyana V.  
Rychkova, Olga O. Usacheva, S.A. Fedotov, Evgenia V. Chernykh*

Water Isotope Studies of the Koryaksky-Avachinsky volcanogenic basin and Paratunsky  
geothermal fields ..... 25

### SECTION II. SEISMICITY IN GEOFLUID VOLCANIC AND HYDROTHERMAL SYSTEMS. MAGMATIC FEEDING SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

*Yulia A. Kugaenko, Anna O. Volynets*

Magmatic plumbing systems of the Tolbachik areal volcanic field ..... 29

*Galina N. Kopylova, Svetlana V. Boldina, E.G. Chubarova*

Water level changes in the well E-1 as an indicator of geodynamic conditions in Koryaksky-  
Avachinsky volcano-tectonic depression, Kamchatka ..... 33

*Vladimir K. Lemzikov, Mihail V. Lemzikov, Evgenia V. Chernykh, Alexey V. Kiryukhin*

Applications of Methods of MEQ's Mechanisms Estimates to Koryaksky Volcano Activity in  
2008-2009 ..... 38

### SECTION III. MAGMATIC FRACTURING AS AN ANALOGUE OF THE DEVELOPMENT OF HYDROCARBON RESERVOIRS WITH HARD-TO-RECOVER RESERVES

*Beatriz Martínez Montesinos, Boris Kaus*

Simulating fluid injection in 3D poro-visco-elasto-plastic rocks..... 43

*Tatiana A. Korovina, E.P. Kropotova, E.A. Romanov*

Role into the impact fluid fracturing in the formation of deposits in the Bazhenov formation:  
natural mechanisms and processes, prospects of modern..... 48

*Sabine Klarner, Olaf Klarner*

Identification of paleovolcanic rocks on seismic data ..... 53

*Alexey V. Solomatin, Sergey A. Fedotov, Alexey V. Kiryukhin*

Geomechanical Interpretation of Seismicity: Applications for Seismic Forecast and  
Hydrocarbon Exploration ..... 55

**SECTION IV. MODELING THE EXPLOITATION OF GEOTHERMAL RESERVOIRS  
IN VOLCANIC AREAS. PROBLEMS OF USING GEOTHERMAL ENERGY IN  
VOLCANIC AREAS FOR HEAT AND ELECTRICITY SUPPLY**

*Larisa A. Vorozheikina, Natalya P. Asulova, Natalya V. Obora*  
Hidden volcanism in the Paratunsky geothermal field ..... 60

*Andrey Y. Polyakov*  
Conditions of water and heat recharge of the Mutnovsky production geothermal reservoir  
(Kamchatka, Russia) ..... 70

*Nikita B. Zhuravlev*  
Modeling Studies of the Paratunsky geothermal field ..... 74

*Nevzat Özgür*  
Conceptual modeling of the geothermal waters in the continental rift zones of the Menderes  
Massif, western Anatolia, Turkey ..... 78

**SECTION V. MECHANISM OF GEYSER FUNCTIONING AND CYCLICITY IN  
HYDROTHERMAL SYSTEMS**

*Tatyana V. Rychkova*  
Modeling and Observations of the Geysers ..... 83

*Anastasiya V. Sergeeva*  
Phase composition of the Velikan geyser deposits (Valley of Geysers, Kamchatka) ..... 89

*Ivan F. Delemen*  
Synthesis of initial Geological Data for the Purposes of Modeling of Exploitation of a Bolshe-  
Banny Geothermal Field: methods and results ..... 93

## Содержание

<i>Кирюхин А.В.</i> Конференция по геотермальной вулканологии 2018: цели, программа и полевые экскурсии.....	8
<b>РАЗДЕЛ I. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ПРИЛЕГАЮЩИЕ К АКТИВНЫМ И ПОТУХШИМ ВУЛКАНАМ</b>	
<i>Николаева А.Г., Карпов Г.А.</i> Подводные гидротермы в кальдерном озере Карымском (восточная Камчатка).....	16
<i>Малик Н.А.</i> Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013-2018 гг.....	21
<i>Кирюхин А.В., Воронин П.О., Журавлев Н.Б., Поляков А.Ю., Рычкова Т.В., Усачева О.О., Федотов С.А., Черных Е.В.</i> Исследование изотопного состава вод Корьякско-Авачинского вулканогенного бассейна и Паратунского геотермального месторождения.....	25
<b>РАЗДЕЛ II. СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛОИДНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ. МАГМАТИЧЕСКИЕ ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ</b>	
<i>Кугаенко Ю.А., Вольнец А.О.</i> Магматическая питающая система Толбачинского поля ареального вулканизма.....	29
<i>Копылова Г.Н., Болдина С.В., Чубарова Е.Г.</i> Изменения уровня воды в скважине е-1 как показатель геодинамического состояния среды Корьякско-Авачинской вулканогенно-тектонической депрессии, Камчатка.....	33
<i>Лемзиков В.К., Лемзиков М.В., Черных Е.В., Кирюхин А.В.</i> Изучение и сопоставление методов определения механизмов вулканических землетрясений в период активизации вулкана Корьякский в 2008-2009 гг.....	38
<b>РАЗДЕЛ III. МАГМАТИЧЕСКИЙ ФРАКИНГ КАК АНАЛОГ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ</b>	
<i>Беатрис Мартинес Монтесинос, Борис Ж.П. Каус и Антон А. Попов</i> Симуляция инъекции жидкости в горные породы в трёхмерной поро-вязко-упруго-пластичной постановке.....	43
<i>Коровина Т.А., Кропотова Е.П., Романов Е.А.</i> Роль флюидоразрыва в формировании залежей в баженовской свите: природные механизмы и процессы, перспективы современных технологий.....	48
<i>Сабине Кларнер и Олаф Кларнер</i> Идентификация древних вулканогенных пород с помощью сейсмических данных .....	53
<i>Соломатин А.В., Федотов С.А., Кирюхин А.В.</i> Геомеханическая интерпретация сейсмичности на шельфе Камчатки: приложения для сейсмического прогноза и поиска углеводородов.....	55

## **РАЗДЕЛ IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ. ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

*Ворожейкина Л.А., Асаулова Н.П., Обора Н.В.*

Предполагаемый скрытый вулканизм на Паратунском геотермальном месторождении ..... 60

*Поляков А.Ю.*

Условия водного и теплового питания Мутновского продуктивного геотермального резервуара (Камчатка, Россия)..... 70

*Журавлев Н. Б.*

Моделирование исследований Паратунского геотермального месторождения..... 74

*Невзар Озгур*

Концептуальное моделирование геотермальных вод в континентальных рифтовых зонах Мендереса, западная Анатолия, Турция..... 78

## **РАЗДЕЛ V. МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ И ЦИКЛИЧНОСТЬ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

*Т. В. Рычкова*

Моделирование и исследование гейзеров ..... 83

*Сергеева А.В.*

Фазовый состав отложений гейзера Великан (Долина Гейзеров, Камчатка) ..... 89

*Делемень И.Ф.*

Синтез исходных геологических данных для целей моделирования эксплуатации Большебанного геотермального месторождения: методы и результаты ..... 93

## **Introduction to Geothermal Volcanology Workshop 2018, Technical Program and Fieldtrips**

**Alexey V.Kiryukhin**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia  
AVKiryukhin2@mail.ru*

The 2-nd international seminar on geothermal volcanology (Geothermal Volcanology Workshop 2018) will be held from 05 to 08 September 2018 in Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. Kamchatka is an active volcanic, seismic and hydrothermal region. Active volcanism is accompanied by magma injections into host structures, magmatic fracturing and the formation of hydrothermal systems adjacent to volcanoes. Engineering study of productive geothermal reservoirs is a necessary condition for their effective use for heat and power supply. Geomechanical analysis of the magmatic fracturing regime with seismic data is extremely important for predicting volcanic activity. It is also useful for analyzing the productivity of geothermal reservoirs and as the analog of hydrocarbon reservoirs development with hard-to-recover reserves. The interdisciplinary focus of this workshop will bring together scientists to solve problems which transcend the framework of international borders.

**Keywords:** Geothermal, Volcanology, Workshop

## **Конференция по геотермальной вулканологии 2018: цели, программа и полевые экскурсии**

**Кирюхин А.В.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, б. Пуйна 9, 683006*

2-ой международный семинар по проблемам геотермальной вулканологии (GeothermalVolcanologyWorkshop 2018) проходил с 05 по 08 сентября 2018 года в г. Петропавловске-Камчатском, Россия. Камчатка является активным вулканическим, сейсмическим и гидротермальным регионом. Активный вулканизм сопровождается инъекциями магмы во вмещающие структуры, магматическим фракингом и формированием гидротермальных систем, прилегающих к вулканам. Инженерное изучение продуктивных геотермальных резервуаров является необходимым условием их эффективного использования для тепло- и электрообеспечения. Геомеханический анализ режима магматического фракинга с использованием сейсмических данных чрезвычайно важен для прогноза вулканической активности и анализа продуктивности геотермальных резервуаров, а также в качестве аналога разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами УВ. Междисциплинарный характер совещания соберет вместе ученых для решения проблем, которые выходят за рамки международных границ.

**Ключевые слова:** Геотермальная, вулканология, конференция, Паратунский, Мутновский, гейзеры, Корякский

### **1. Introduction**

Geothermal Volcanology Workshop 2018 provides a unique opportunity to meet with other scientists working in the Far East segment of the North-West Pacific as it makes an excellent presentation for those willing to participate in research of this unique region. In 2018, the meeting will begin the day after the start of the 2-nd International Geothermal Conference GEOHEAT will combine the efforts of scientists for geothermal energy research in the areas of modern volcanism.

Topics of scientific sessions:

- Hydrothermal systems adjacent to active and extinct volcanoes
- Seismicity in geofluid volcanic and hydrothermal systems
- Magmatic feeding systems of active volcanoes
- Modeling the exploitation of geothermal reservoirs in volcanic areas
- Problems of using geothermal energy in volcanic areas for heat and electricity supply

- Magmatic fracturing as an analogue of the development of hydrocarbon reservoirs with hard-to-recover reserves
- Mechanism of geyser functioning and cyclicity in hydrothermal systems

## 2. Field trips

The following Field Trips are scheduled during GVW-2018: (FT-1) Koryaksky Volcano's Dyke Fields & Thermal Mineral Springs, (FT-2) Mutnovsky & Paratunsky Geothermal Areas, (FT-3) Valley of Geysers (see Figure 1).

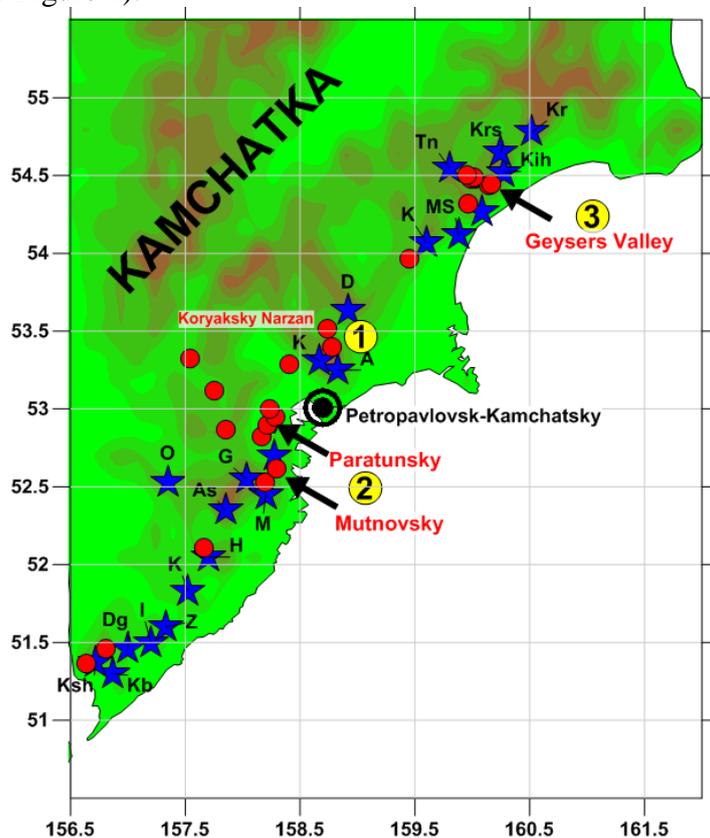


Figure 1 –Field trip (1, 2 & 3) locations on Kamchatka map. Active volcanoes (blue stars) and most significant hydrothermal systems (red circles) are shown too.

### 2.1 Field Trip – 1: Koryaksky Volcano's Dyke Fields & Thermal Mineral Springs

The field trip lasts 10 hours (from 9-00 to 19-00). Number of participants is up to 10. Transport (car+helicopter), map and root points (Figure 2): IVS FEB RAS – Avachinsky Base /IVS Base (AVH) – IVS FEB RAS (track+car); Avachinsky Base (AVH) – Dyke field on the south slope of Koryaksky volcano – Koryaksky Narzan (K8) – **Koryaksky Narzan (K2)** – **Koryaksky Narzan (K1)** – Isotovskiy Hot Spring (IS) - Avachinsky Base (AVH) (helicopter). Foods: box lunch & Koryaksky Narzan water.

The Avachinsky-Koryaksky volcanogenic basin (Figure 2), which has an area of 2530 km<sup>2</sup>, is located 25 km from Petropavlovsk-Kamchatsky City and includes five Quaternary volcanoes (two of which, Avachinsky (2750 masl) and Koryaksky (3456 masl), are active), and is located within a depression that has formed atop Cretaceous basement rocks. Magma injection zones (dykes and chamber-like shapes) are defined by plane-oriented clusters of local earthquakes that occur during volcanic activity (mostly in 2008-2011) below Koryaksky and Avachinsky volcanoes at depths ranging from -4.0 to -2.0 km and +1.0 to +2.0 km, respectively. Water isotopic ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) data indicate that these volcanoes act as recharge areas for their adjacent thermal mineral springs (Koryaksky Narzans, Isotovskiy and Pinachevskiy) and the wells of the Bystrinsky and Elizovo aquifers. Carbon  $\delta^{13}C$  data in CO<sub>2</sub> from CO<sub>2</sub> springs in the northern foothills of Koryaksky Volcano reflect the magmatic origin of CO<sub>2</sub>. Carbon  $\delta^{13}C$  data in methane CH<sub>4</sub> reservoirs penetrated by wells in the Neogene-Quaternary layer around Koryaksky and Avachinsky volcanoes indicate the thermobiogenic origin of methane.

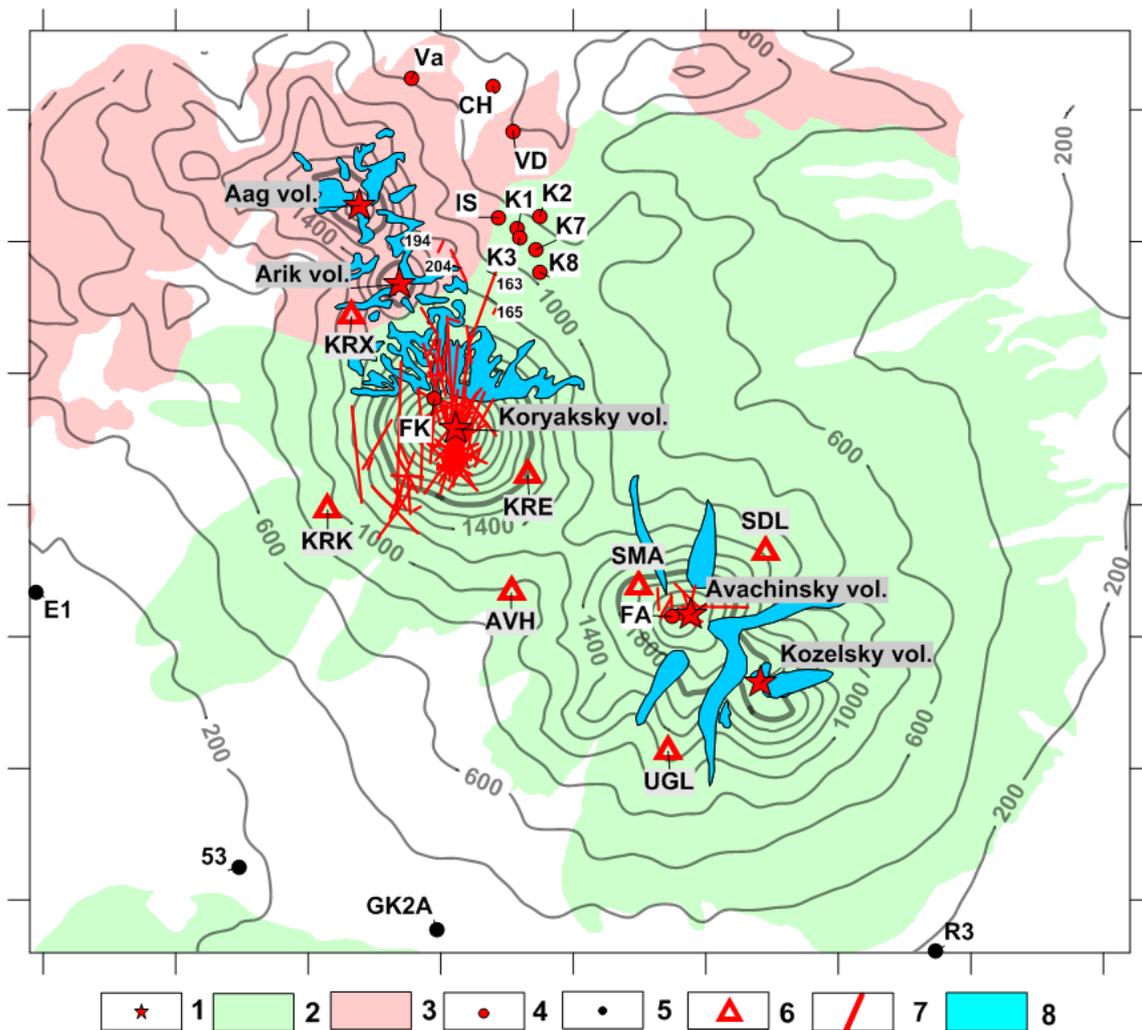


Figure 2 –Geological map of the Koryaksky–Avachinsky volcanogenic basin. Legend: (1) The summits of the Avachinsky, Koryaksky, Kozelsky, Arik, and Aag volcanoes; (2) Avachinsky, Koryaksky, Kozelsky volcanoes and their eruptive products; (3) Pinachevsky extrusions  $Q_{2-3}$ ; (4) thermal features (for details, see Table 1): FA - fumaroles on Avacha Volcano; FK - fumaroles on Koryaksky Volcano; K1, K2, K3, K7, K8 - thermal mineral springs of Koryaksky Narzan; IS - Izotovskiy; VD - Vodopadny; CH - Chistinsky; Va - Vakinsky; (5) deep hydrogeological wells; (6) KB GS RAS seismograph stations; (7) dykes traced at -3000 masl below Koryaksky Volcano and 1500 masl below Avachinsky Volcano; (8) glaciers. Note: The isolines show the topographic surface, and the ticks along the axes represent intervals of 5 km.

### 2.1 Field Trip – 2: Mutnovsky and Paratunsky Geothermal Areas

The field trip lasts 10 hours (from 9-00 to 19-00). The number of participants is up to 10. Transport (car+helicopter), map and root points (Figures 3&4): IVS FEB RAS – V-Paratunsky hot springs – IVS FEB RAS (track-car); V-Paratunsky hot springs – Vilyuchinsky Volcano – N-Zhirovskoy hot spring (16) – Voynovskiy hot spring (16) – V-Mutovskiy GeoPP 12 MWe – Mutnovskiy GeoPP 50 MWe – **Dachny Steam Jets** (7) – Dyke Field in Mutnovskiy Volcano Crater (3) – Vulcannaya River Waterfall 60 m – Cold Springs in Gorely Volcano – **Vilyuchinsky hot springs** - V-Paratunsky hot springs (helicopter). Meals: box lunch & Silver Creek water (K1).

The Mutnovskiy geothermal area is part of the Eastern Kamchatka active volcano belt. Mutnovskiy, 80 kY old and an aging strato-volcano (a complex of 4 composite volcanic cones), acts as a magma- and water-injector into the 25-km-long North Mutnovskiy extension zone (Figure 3). Magmatic injection events (dykes) are associated with plane-oriented MEQ (Micro Earth Quakes) clusters, most of them occurring in the NE sector of the volcano ( $2 \times 10 \text{ km}^2$ ) at elevations from -4 to -2 km, while some magmatic injections occur at elevations from -6.0 to -4.0 km below the

Mutnovsky production field. Water recharge of production reservoirs is from the Mutnovsky volcano crater glacier (+1500 to +1800 masl), which was confirmed by water isotopic data ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) of production wells at an earlier stage of development. The Mutnovsky (Dachny) 260-310°C high-temperature production geothermal reservoir with a volume of 16 km<sup>3</sup> is at the junction of NNE- and NE-striking normal faults, which coincides with the current dominant dyke injection orientation. TOUGH2-modeling estimates of the reservoir properties are as follows: the reservoir permeability is 90-600 e-15 m<sup>2</sup>, the deep upflow recharge is 80 kg/s and the enthalpy is 1420 kJ/kg. Modeling was used to reproduce the history of the Mutnovsky (Dachny) reservoir exploitation since 1983 with an effective power of 48 MWe by 2016. Modeling also showed that the reservoir is capable of yielding 65-83 MWe of sustainable production until 2055, if additional production drilling in the SE part of the field is performed. Moreover, this power value may increase to 87-105 MWe if binary technologies are applied. Modeling also shows that the predicted power is sensitive to local meteoric water influx during development. Conceptual iTOUGH2-EOS1sc thermal hydrodynamic modeling of the Mutnovsky magma-hydrothermal system as a whole reasonably explains its evolution over the last 1500-5000 years in terms of heat recharge (dyke injection from the Mutnovsky-4 funnel) and mass recharge (water injection through the Mutnovsky-2 and Mutnovsky-3 funnels) conditions as previously mentioned.

The Paratunsky low temperature geothermal field (Figure 4) has been operating since 1964. During the period of exploitation from 1966-2014, 321 Mt of thermal water (Cl-Na, Cl-SO<sub>4</sub>-Na composition, M up to 2600 ppm) with temperatures of 70-100°C was extracted and used for district heating, balneology and greenhouses. The structure of the 40 km<sup>3</sup> Paratunsky low temperature (80-110°C) geothermal volcanogenic reservoir was geometrically characterized, hot water upflow regions and the 3D permeability distribution were identified with hydrogeological data, and the distribution of the feed zones and 3D temperatures were constrained by 3D spline approximation. Water isotope and gas (N<sub>2</sub>, 96-98%) data analysis indicated that the main recharge region of the Paratunsky geothermal reservoirs is the Viluychinsky Volcano (2173 masl) and adjacent highly elevated structures, located 25 km south from the geothermal field. Production zones coinciding with dip angle fractures occur in the condition of radial extension (possibly caused by magmatic origin heat sources below the reservoir) and hydraulic fracturing (possibly caused by the elevated position of the Viluychinsky Volcano's recharge region).

TOUGH2 modeling of the thermo-hydrodynamic natural state and the history of exploitation (involving pressure, temperature and chemical changes response to utilization) between 1965 and 2014 yield estimates of hot water upflow rates (190 kg/s), the production reservoir compressibility (up to 4×10<sup>-8</sup> Pa<sup>-1</sup>) and permeability (up to 1.4 D). Modeling confirmed areal discharge of the thermal water from the production reservoir in the top groundwater aquifer (top Dirichlet boundary conditions). Modeling of the chemical (Cl-) history of exploitation provides an explanation of gradual Cl- accumulation due to the inflow of chloride-containing water through the eastern (open) boundary of the geothermal reservoirs. Modeling of the long-term exploitation until 2040 with an exploitation load of 256 kg/s merely shows a low pressure drop (0.7 bars) and an insignificant drop of temperatures in the production geothermal reservoir of the Paratunsky geothermal field.

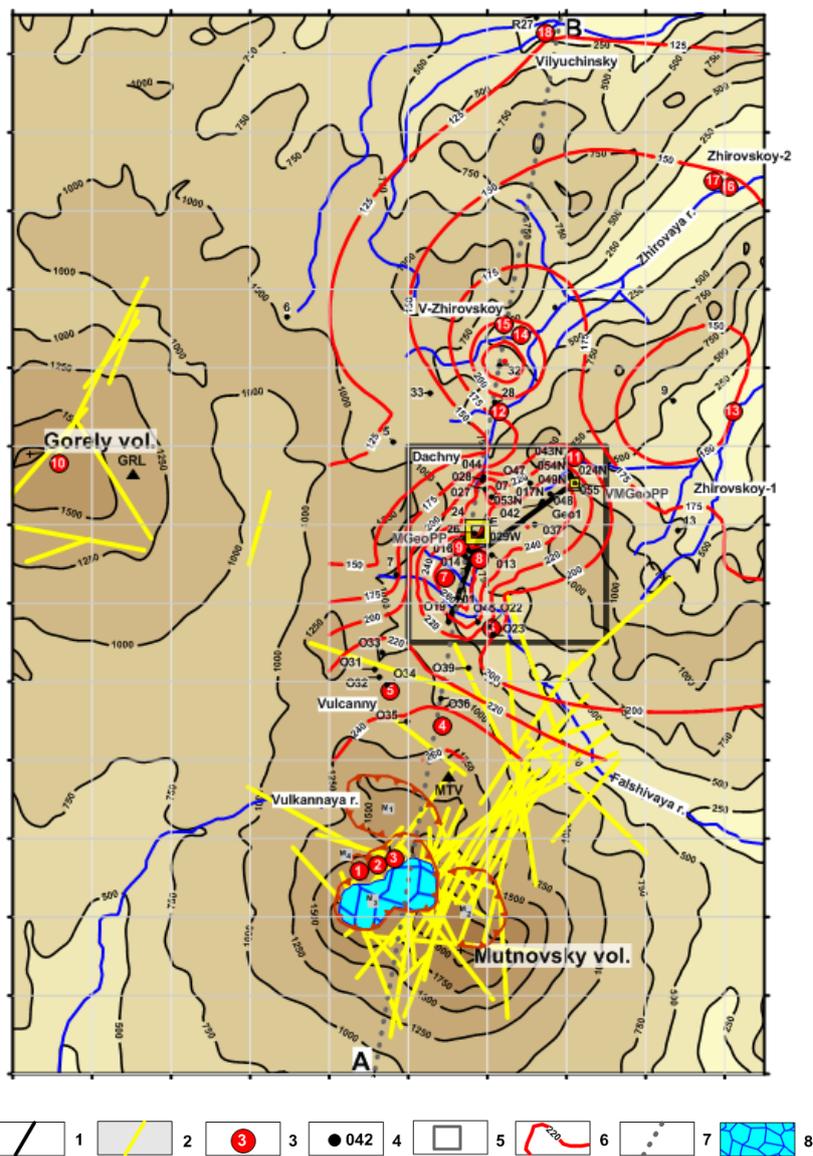


Figure 3 – Schematic map and topography of the Mutnovsky geothermal area, grid scale 1 km. Legend: 1 – Production 2D plane zone traces at -250 masl; 2 – Magmatic injection (dykes) 2009-2016 traces at -3000 masl; 3 – thermal features (1-18, see below); 4 – wells; 5 – rectangle is a detailed TH model area; 6 – temperature isolines at -250 masl; 7 – AB – line of cross-section; and 8 – Glacier in the Mutnovsky volcano crater. Note-1:  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  – funnels of Mutnovsky volcanoes 1, 2, 3 and 4, respectively (see section 2.3 for details). Note-2: MGeoPP – the existing Mutnovsky geothermal power plant 50 MWe installed; VMGeoPP – the existing Verkhne-Mutnovsky geothermal power plant 12 MWe installed; Dachny, Vulcanny, V-Zhirovskoy, Zhirovskoy-1, Zhirovskoy-2, and Vilyuchinsky – the potential sites for additional geothermal electricity production.

Thermal features: 1 – Active funnel, 2- Bottom field, 3- Upper field, 4,5 – North-Mutnovsky East and West, respectively, 6 – New 2003, 7 – Dachny (Active), 8 – Radon spring, 9 - Medveji, 10 – Gorely volcano gas emission jets, 11 – Verkhne-Mutnovsky, 12 – Piratovsky spring, 13 – Voinovsky spring, 14,15 – Verkhne-Zhirovskoy chloride hot springs and fumaroles, respectively, 16,17 – Nizhne-Zhirovskoy chloride hot springs, and 18,19 – Vilyuchinsky chloride hot springs and well R27, respectively.

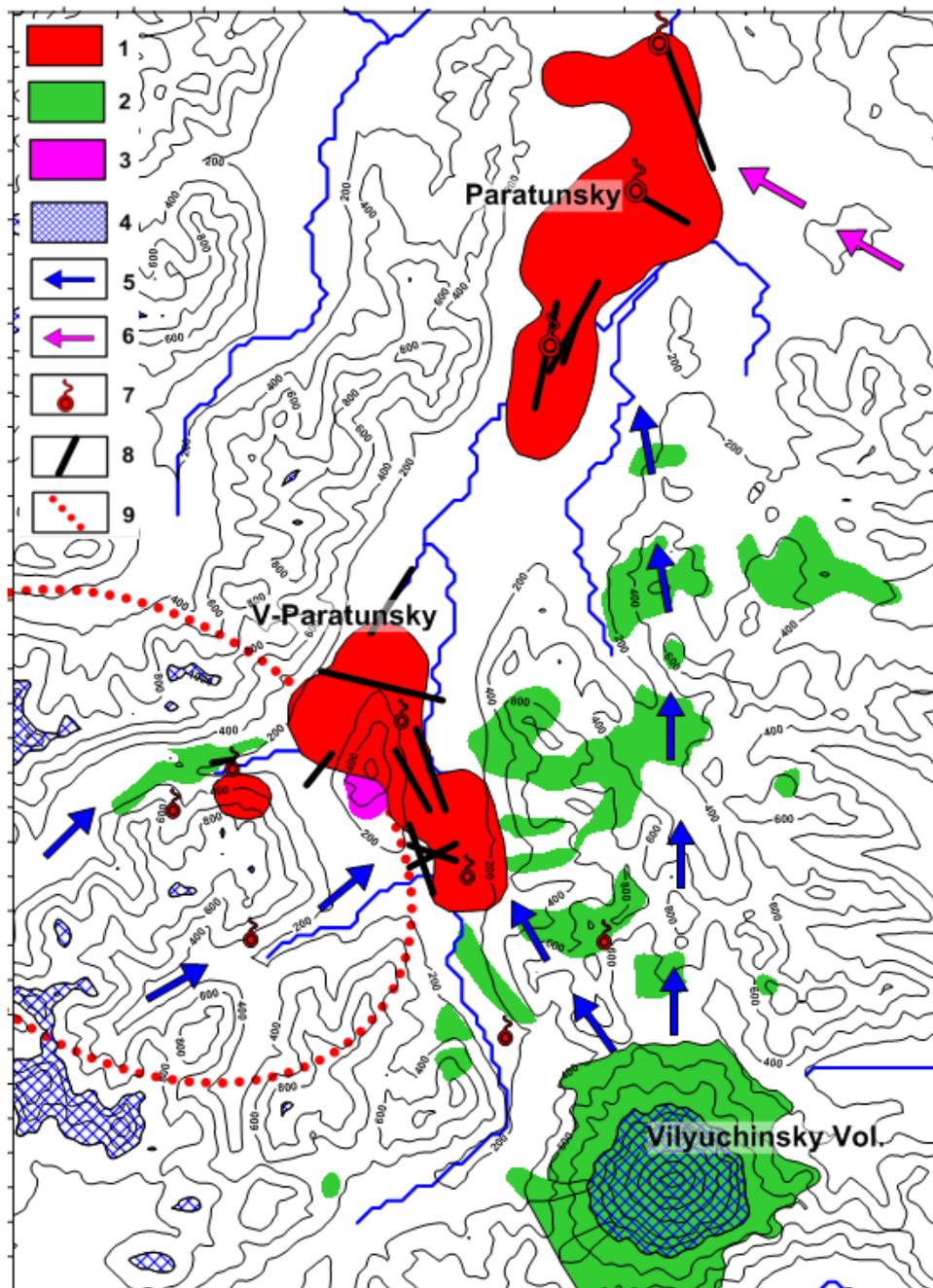


Figure 4 – Paratunsky geothermal fields geo-filtration structure, recharge and boundary conditions, topographical elevations in the background, grid scale 1 km. Legend: 1 – counters of production geothermal reservoirs at -750 masl based on geoisotherm 75°C (Paratunsky) and 60°C (Verkhne-Paratunsky); 2 – Holocene lava flows and cinder cones; 3 – Rhyolite extrusions 0.5-0.8 MY; 4 – water recharge regions for the Paratunsky geothermal reservoirs (with an elevation of more than 1000 masl); 5- Horizontal projections of fluid flows from recharge regions to the production geothermal reservoirs; 6 – Chloride water attracted into the production reservoir due to its exploitation; 7 – Hot springs; 8 – Production zone traces at -750 masl; 9 – Caldera rim 1.2-1.5 MY (Leonov et al., 2007).

### 2.1 Field Trip – 2: Valley of Geysers

The field trip lasts 10 hours (from 9-00 to 19-00). The number of participants is up to 10. Transport (car+helicopter), map of the Valley of Geysers (Figure 4): IVS FEB RAS – Nikolaevka Airport – IVS FEB RAS (car); Nikolaevka Airport – **Valley of Geysers (Pervenetz, Bolshoy, Mudflow 2014) – Uzon Caldera (Shaman)- Nikolaevka Airport** (helicopter). Meals: box lunch & Malkinsky Water.

The Geysers Valley hydrothermal system (Figure 5) is hosted within a system of two permeable faults (revealed by mapping thermal features), located above a suggested partially melted magmatic body and recharged by meteoric water along the outcrops of rhyolite-dacite extrusions. Fast erosion is stimulating the significant discharge rate, the geyser's cycling mode and landslide events. The Giant landslide took place on June 3, 2007, when  $20 \times 10^6 \text{ m}^3$  of rocks were shifted 2 km downstream, more than 23 geysers were buried or submerged, and Podprudnoe Lake was dammed, injecting cold water into submerged geysers. Possible triggers of the Giant Landslide include the inclination of the sliding plane towards the Geysernaya river basin, a pressure increase in the fluid-magma system, hanging block saturation by water during spring flooding, hydrothermal alteration weakening of the sliding plane, and steam explosions.

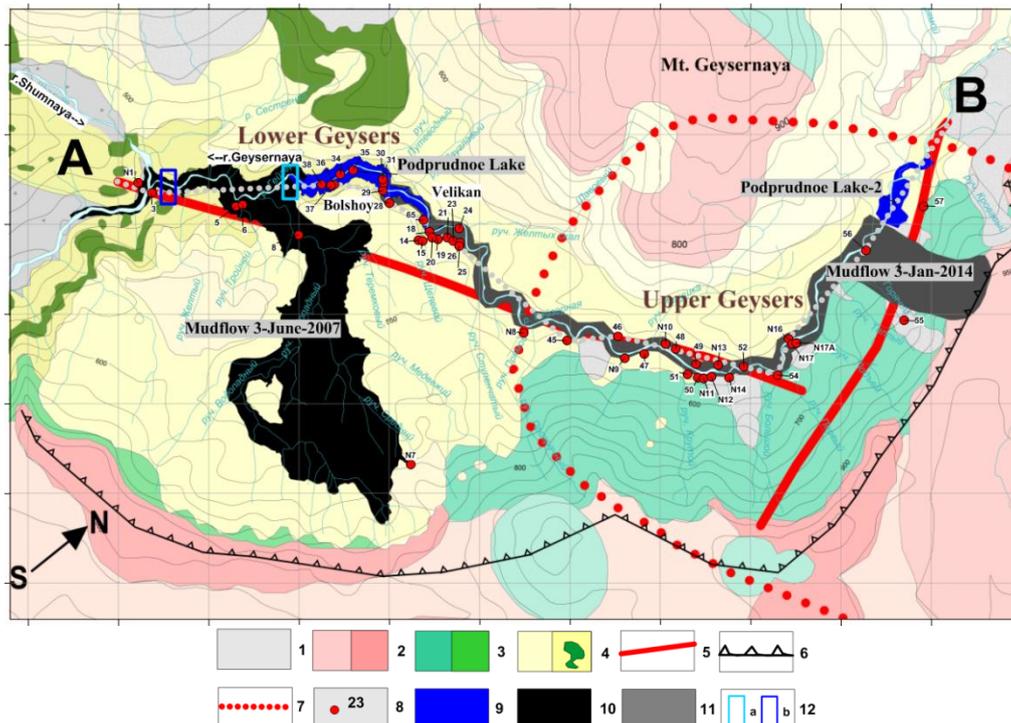


Figure 5 – Schematic map of the Valley of Geysers. Legend: 1 - Alluvial and glacial deposits  $Q_{3-4}$ ; 2 - permeable units of rhyolite, dacite and andesite extrusions ( $\alpha Q_3^4$ ); 3 - basalt, andesite, and dacite lavas and pyroclastics ( $\alpha Q_3^{1-2}$ ); 4 - low permeability units of caldera lake deposits ( $Q_3^4$ ), which are complicated by a dyke complex ( $Q_3^{ust}$ ); 5 - assumed thermal fluid-conducting faults; 6 - Uzon-Geysernaya caldera boundary; 7 - uplifted area that is associated with the contours of the active magma reservoir (Lundgren et al., 2006); 8 - geysers and hot springs (for numeration, see Table 6 in Kiryukhin, 2016); 9 - Podprudnoe Lake and Podprudnoe Lake-2 dumb by mudflows; 10 - catastrophic landslide-mudflow on 3.06.2007; 11 - landslide-mudflow on 3.01.2014; 12 - Geysernaya river flow rate measurement points: a – Podprudnoe Lake exit, b – Geysernaya river mouth. Grid scale – 500 m. AB – grey dotted line of cross-section.

The monitoring of the Velikan and Bolshoy geysers after the catastrophic landslide on 3.06.2007 (which dammed and created Podprudnoe Lake, drowning some geysers) and before a mudflow on 3.01.2014 (which destroyed the dam and almost completely drained Podprudnoe Lake) shows that the interval between eruptions (IBE) of the Bolshoy Geyser decreased from 108 to 63 min and that the IBE of the Velikan Geyser slowly declined over three years from 379 min to 335 min. The seasonal hydrological cycle of the Velikan Geyser shows an increase in the IBE during winter (average of 41 min). The dilution of the chloride deep components of the Bolshoy (-17%) and Velikan Geysers (-12%) is also observed. A local TOUGH2 model of the Velikan geyser is developed and is successfully calibrated against temperature observations at both the mid-height and base of the conduit of the Velikan Geyser, which shows the essential role of the  $\text{CO}_2$  in the functionality of the geyser. Temperature logging in geysers Velikan (1994, 2007, 2015, 2016, 2017) and Bolshoy (2015, 2016, 2017) conduits shows pre-eruption temperatures below boiling at

corresponding hydrostatic pressure, that means partial pressure of CO<sub>2</sub> creates gas-lift upflow conditions in geyser conduits. Velikan geyser IBE history explained in terms of gradual CO<sub>2</sub> recharge decline (1941-2013), followed by CO<sub>2</sub> recharge significant dilution after the mudflow of Jan. 3, 2014 also reshaped geyser conduit and diminished its power.

1941-2017 period of the Valley of Geysers monitoring (Kamchatka, Kronotsky Reserve) reveals a very dynamic geyser behavior under natural state conditions: significant changes of IBE (interval between eruptions) and power of eruptions, chloride and other chemical components, and pre-eruption bottom temperature. Nevertheless, the total deep thermal water discharge remains relatively stable at around of 280 kg/s, thus all of the changes are caused by redistribution of the thermal discharge due to Giant Landslide of June 3, 2007, Mudflow of Jan. 3, 2014 and other events of geothermal caprock erosion and water injection into the geothermal reservoir.

*This work was supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-05-00052.*

### References

1. A. Kiryukhin, V. Lavrushin, P. Kiryukhin, P. Voronin "Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia)," *Geofluids*, vol. 2017, Article ID 4279652, 21 pages, 2017. doi:10.1155/2017/4279652.

2. Kiryukhin A.V., Vorozheikina L.A., Voronin P.O., Kiryukhin P.A. THERMAL-PERMEABILITY STRUCTURE AND RECHARGE CONDITIONS OF THE LOW TEMPERATURE PARATUNSKY GEOTHERMAL RESERVOIRS, KAMCHATKA, RUSSIA // *Geothermics* 70 (2017) 47–61.

3. Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O., Kiryukhin P.A. THERMAL-PERMEABILITY STRUCTURE AND RECHARGE CONDITIONS OF THE MUTNOVSKY HIGH TEMPERATURE GEOTHERMAL FIELD (KAMCHATKA, RUSSIA) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 356C (2018) pp. 36-55. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.02.010

4. A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, I.K. Dubrovskaya Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // *Applied Geochemistry Journal*, *Applied Geochemistry* 27 (2012) 1753–1766

5. A. Kiryukhin. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 323, p. 129-147, 2016.

6. A. Kiryukhin, V. Sugrobov, E. Sonnenthal. Geysers Valley CO<sub>2</sub> Cycling geological Engine (Kamchatka, Russia) // *Geofluids Journal*, 2018, 17 p. <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/aip/1963618/>

## SECTION I. HYDROTHERMAL SYSTEMS ADJACENT TO ACTIVE AND EXTINCT VOLCANOES

### РАЗДЕЛ I. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ПРИЛЕГАЮЩИЕ К АКТИВНЫМ И ПОТУХШИМ ВУЛКАНАМ

УДК 550.42.47:551.214

#### **Underwater hydrotherms in the Karymskoye calderalake (Eastern Kamchatka)**

**Antonina G. Nikolaeva, Gennady A. Karpov**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia,  
ocean@kscnet.ru*

Physical-chemical features of underwater thermal vents discovered during the diving surveys conducted in the Tokarev underwater crater have been considered. Their appearance was triggered by the 1996 underwater eruption that occurred in the Karymskoye caldera lake. Algae and microorganisms (diatoms, blue-green, cyanobacteria, etc.) were reported in the areas of mixing of the lake waters with thermal ones. Occurrence of submerged discharge vents in the lake was evidenced by the newly-formed sectors of the hydrothermal system existing within the volcanic caldera, and accounted for the disagreements of the water balance observed here for almost ten years.

**Keywords:** caldera lake, underwater eruption, diving surveys, submerged thermal waters, algae-bacterial communities, water balance

#### **Подводные гидротермы в кальдерном озере Карымском (восточная Камчатка)**

**Николаева А.Г., Карпов Г.А.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Россия, Петропавловск-Камчатский, 683006;*

Приводится физико-химическая характеристика подводных гидротерм, обнаруженных в процессе водолазных работ в подводном кратере Токарева. Возникли они в связи с фреато-магматическим извержением в кальдерном озере Карымском (1996 г.). В зонах подводного смешения озерных вод с термальными, отмечалось появление водорослей и микроорганизмов (диатомовых, зеленых водорослей, цианобактерий и др.). Наличие подводных разгрузок в озере подтверждало образование новых участков гидротермальной системы в вулканической кальдере и объясняло не сбивку в водном балансе озера на протяжении почти десятка лет.

**Ключевые слова:** кальдерное озеро, подводное извержение, водолазные работы, подводные гидротермы, альгобактериальные сообщества, водный баланс

Research goal: Investigating the environments of gas-water discharges' formation within the explosive Tokarev Crater related to the 1996 underwater eruption. Research tasks included discovering the underwater discharge vents that appeared after the 1996 phreatic-magmatic eruption in the Karymskoye caldera lake, T°C and pH measurements, defining their gas and chemical compositions, conducting biological studies.

Our study object is the Karymskoye Lake located in the Akademii Nauk Caldera. 6 km North of the Caldera, the active Karymsky Volcano is located in the Karymskaya Caldera. Both calderas and two active volcanoes (Karymsky and Maly Semiachik) are situated in the southern sector of the Eastern Volcanic Belt of Kamchatka and are confined to the large long-lived

Karymsky Volcanic Center (KVC). KVC is characterized by repeated intensifications of seismic-tectonic and volcanic activity.

In January of 1996, a phreatic-magmatic eruption occurred in the caldera hosting the Karymskoye freshwater lake (pH=3.2, Cl-SO<sub>4</sub> / Ca-Na). The eruption lasted for about 24 hours and was accompanied by intense supply of heat and matter to the lake, as well as by massive explosions of steam-gas and scoria-bomb material. Almost simultaneously, a powerful eruption of the nearby Karymsky Volcano took place.

Along with certain tectonic processes that had occurred long ago in the KVC, the outstanding 1996 events in the caldera were preceded by the changes within the water environment of the freshwater basin, which was described in detail by many authors [Karpov *et al.*, 1996; Fedotov, 1997; Muraviev *et al.*, 1997; Maguskin *et al.*, 1997; Gordeev *et al.*, 1998; Fazlullin *et al.*, 2000; Karpov, 2004, and others].

Underwater phreatic-magmatic eruption caused drastic changes in the chemical composition of the water system of the Akademii Nauk Caldera.

Formerly freshwater Karymskoye Lake (pH=7.2 and Cl-HCO<sub>3</sub> / Na water composition) immediately turned acidic (pH=3.2, Cl-SO<sub>4</sub> / Ca-Na), which naturally whipped out the entire organics of the lake, first of all – fish [Karpov *et al.*, 1996; Fedotov, 1997; Muraviov *et al.*, 1997; Fazlullin *et al.*, 2000].

Eruption in the northern sector of the lake was evidently triggered by interaction of gas-saturated magma supplied from the deep chamber along the newly-formed fissures with the internal waters of the Akademicheskaya geothermal system, and successively with the lake waters.

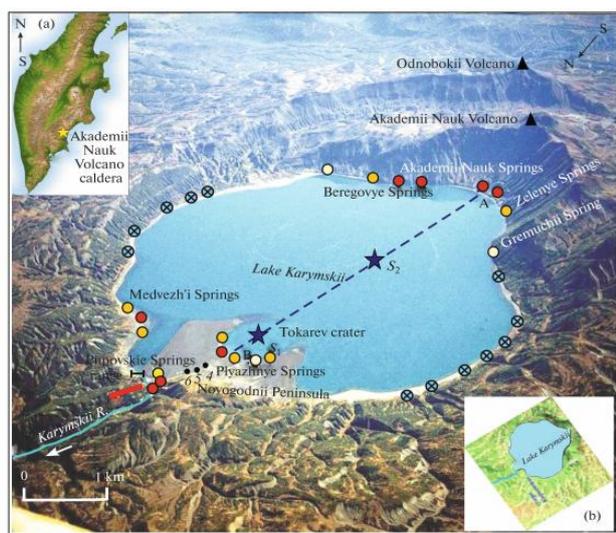
Amount of endogenous matter supplied and dissolved in the lake water made about 20 thousand tons of Cl-ion and 200 thousand tons of SO<sub>4</sub>-ion.

As a result of the eruption, Novogodny Peninsula was formed in the southern sector of the lake, underwater Tokarev Crater being the center of the 1996 eruption.

The crater was actively degassing and steaming, which was visible by intense bubbling of the lake water. The entire 1-m- thick ice covering the lake surface melted, intense steaming was observed. Steam cloud raised up to 3 km. After the eruption, lake water was stirred, showing temperatures of 22-50°C [Karpov, 2004].

Prior to the lake eruption, hot Cl/Na waters were discharged mostly on the southern shore of the lake. However, some thermal occurrences were observed as unfrozen patches at the lake shore (early June, 1984), as well as in the Karymskaya riverhead, in the north-eastern and southern sectors of the lakeshore [Pilipenko, 1989].

Of specific importance was the appearance of newly-formed thermal vents and a geyser (**Fig 1**):



- at the southern shore of the lake, in the area of major discharges of ancient hydrotherms of Akademii Nauk;
- in the newly-formed Novogodny Peninsula (blast-collapse funnels);
- at the north-eastern rim of the Tokarev Crater (Plyazhnye Springs);
- in the thermal field near the Karymskaya riverhead;
- re-activated Medvezh'i Springs in the north-eastern sector of the lake.

Figure 1 – A view of Lake Karymskii in the caldera from NW. Intense discharges of high-temperature thermal waters occurred along the narrow fault zone of sub-meridional strike

After the 1996 event, monitoring of chemical composition variations of the lake and thermal waters has been carried out (1996-2015) [Vakin, Pilipenko, 1998; Karpov *et al.*, 2008; Nikolaeva *et al.*, 2005; 2018].

In the north-eastern part of the Tokarev Crater thermal seepages occurred both at the beach beside the lake waterline (Plyazhnye Springs) [Vakin, Pilipenko, 1998; Karpov, 2004], and in the adjacent shallow part of the lake where water got heated up to 50°C.

Here, development of thin films of algae-bacterial colonies was observed [Lupikina, 2005], as well as intense bubbling of free-gasses, which was considered a possible evidence of underwater discharge vents formed within the Tokarev Crater. Therefore, diving operations were claimed necessary aimed at the search for the bottom thermal vents within the crater.

Diving surveys performed in 1999-2000 at depths of 10-12 m revealed submerged thermal water discharges in the lake basin and in the Tokarev Crater.

Areas hosting bottom hydrothermal vents with temperatures of 21-64°C and pH= 6.2-7.7 were found in the northern, western and southern sectors of the underwater Tokarev Crater, at depths of 6-12 m (**Fig. 2**).

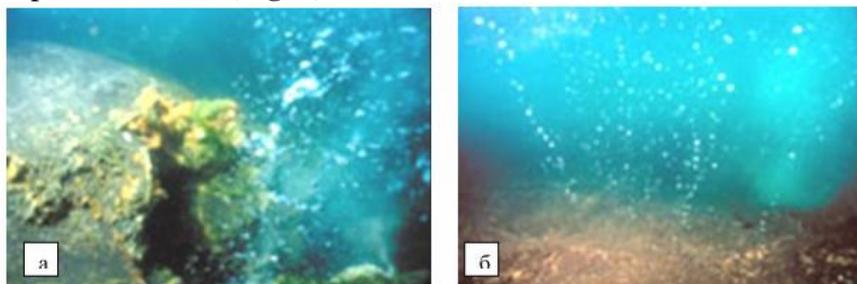


Figure 2 – Bottom vents showing intense degassing at a depth of 10-12 km in the Tokarev Crater: located in the north-eastern slope of the crater (a) on an isthmus formed in 1996 between the lake and the crater (b)

The vents occurred within narrow bolsons (trenches) oriented in sub-meridional direction coaxial to surface fractures in the Karymskaya River sides caused by an earthquake that had preceded the 1996 eruption. Chemical composition of underwater hydrotherms differed from that of the Tokarev Crater water by high contents of Na, K, Cl, HCO<sub>3</sub>, H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> (**Fig. 3**).

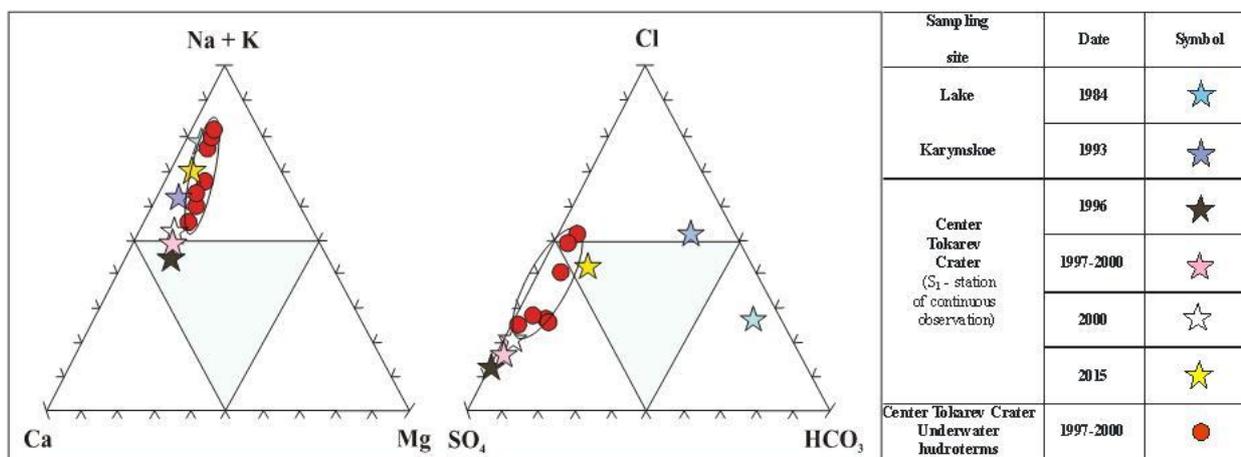


Figure 3 – Underwater hydrotherms location in the Tokarev Crater and the evolutionary trends of salinity in Lake Karymskii (1984-2015)

2-3 years after the eruption, stratified mats of green cyanobacteria colonies (*Phormidium*) were formed in areas of thermal discharges within the lake, most of them occurring in the mixing zone of lake and thermal waters (under T = 20-55°C). Microorganisms were reported to recover.

In 2004, divers reported 4 areas of bottom vents located within the inner circle-zone of the Tokarev Crater, a bit shallower (at a depth of 4-7 m) than those found in 2000.

Mats were shaped as tiny knolls and round loaves with gas accumulating inside. When punctured, these mats released free gas whose composition was dominated by N<sub>2</sub> (up to 97 vol. %)

Fine pyroclastic material was gradually inhabited by numerous diatoms (*Pinnularia*, *Navicula*, *Nitzschia*), while plankton was dominated by *Microcystis* sp. (*Cyanoprocariota*) [Lupikina, 2005].

In contrast to 1999-2000 vents, the ones discovered in 2004 occurred as tiny funnels discharging waters with T=30-45°C, pH = 6.6-6.8 and very poor degassing. Bottom was covered by black silt spotted orange (iron oxides).

Finest films of whitish and pale-green algae-bacteria grew around the funnels.

Since 2005, activity of the Plyazhnye Springs has notably faded showing decreased temperature, lower water discharge rate and reduced area of the Plyazhnye Springs near the north-eastern waterline of the Tokarev Crater.

Occurrence of underwater discharge vents in the Karymsloye Lake supported the formation of new sectors of the hydrothermal system in the volcanic caldera, and accounted for the inconsistency of water balance in the lake observed for almost 10 years [Nikolaeva *et al.*, 2018]. Hidden discharge of water into the lake (including underwater thermal discharges) in 2012 was about 10 times reduced if compared to that of 1996 (Fig. 4).

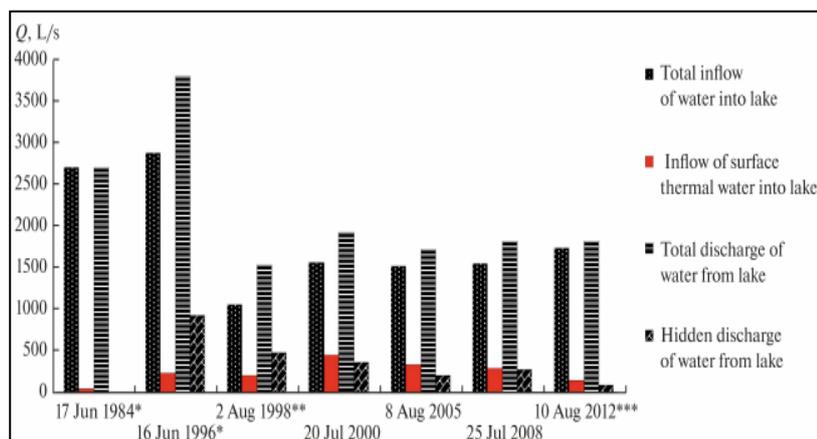


Figure 4 – Components of the water balance for the Lake Karymskii basin based on the 1984-2012 observations. The data are from: \*(Pilipenko, 1998), \*\*(Vakin and Pilipenko, 1998) and \*\*\* (Taran *et al.*, 2013); the rest are out data

Of specific challenge are also the other lakes of Kamchatka located in Unoz, Ksudach, Maly Semiachik and other volcanic calderas [Karpov, 1988; Pilipenko *et al.*, 2001; Nikolaeva, Bychkov, 2011].

Further monitoring of gas-hydrotherms occurrences related to the 1996 eruption is required.

Southern and south-eastern submerged slope of the Karymskoye Lake hosting intense gas-vents is still quite poorly studied.

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no 11-05-00572-a, 17-05-00257.*

## References

1. Fazlullin S.M., Ushakov S.V., Shuvalov R.A., *etal.* The under water eruption in the Akademii Nauk Caldera, Kamchatka and its impact: hydrologic, hydrochemical and hydrobiological investigations // Vulkanologiya i Seismologiya. 2000. № 4. P. 19-32.
2. Fedotov S.A. On the 1996 eruptions in the Akademii Nauk Caldera and Karymsky Volcano, Kamchatka, their study and mechanism // Vulkanologiya i Seismologiya. 1997. № 5. P. 3-38.
3. Gordeev E.I., Droznin D.V., Kasahara M., *etal.* Seismic phenomena accompanying the 1996 eruptions in the Karymsky volcanic center // Vulkanologiya i Seismologiya. 1998. № 2. P. 28-48.
4. Karpov G.A. *Recent hydrotherms and Hg-Sb-As mineralization.* Moscow: Nauka. 1988, 183 p.
5. Karpov G.A., Lupikina E.G., Nikolaeva A.G., Bychkov A.Yu., Lapitski S.A., Nikolaeva I.Yu. Dynamics of changing hydrogeochemical characteristics, thermal conditions and biocenoses of freshand thermal waters in the Karymskoye Lake basin after hazard oussub watereruption in the Akademi i Naukcaldera (Kamchatka) in 1996 // Vulkanologiya i Seismologiya. 2008. № 4. P. 3-21.
6. Karpov G.A., Muraviev Y.D., Shuvalov R.A., *et al.* A subaqueous eruption from the caldera of Akademii Nauk volcano on January 2-3 1996 // Newsletter of IAVCEI Commission on VolcanicLakes. 1996. P. 14-17.
7. Karpov, G.A. Some geochemical features of the underwater eruption of January 2-3, 1996 in Akademii Nauk caldera. Bulletin of Kamchatka Regional Association Educational-Scientific Center. Earth Sciences (Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle). 2004. № 4. P. 81-89.

8. *Leonov V.L.* Surface breakage associated with the earthquake and eruptions occurring in the Karimskiy Volcanic Center on January 1-2, 1996 // *Vulkanologiya i Seismologiya*. 1997. № 5. P. 113-129.
9. *Lupikina, E.G.* The recovery of biota during the postcatastrophic period of a volcanic eruption: Algocenosis succession in Lake Karymskii, 1996-2003 // *Vulkanologiya i Seismologiya*. 2005. № 1. P. 37-43.
10. *Magus`kin M.A., Fedotov S.A., Levin V.E., and Bakhtiarov V.F.* Ground surface deformation caused by seismic and volcanic activity in the Karymsky Volcanic Center during January 1996 // *Vulkanologiya i Seismologiya*. 1997. № 5. P. 97-112.
11. *Murav`ev Ya.D., Fedotov S.A., Budnikov V.A., et al.* Volcanic activity in the Karymsky Center in 1996: Summit eruption of Karymsky Volcano and phreatomagmatic eruption in Akademii Nauk Caldera // *Vulkanologiya i Seismologiya*. 1997. № 5. Pp. 38-70.
12. *Nikolaeva A.G., Bychkov A.Yu.* The microelements concentration in hydrothermal and lake waters of Ksudach Volcano Caldera / Proceedings of the 7<sup>th</sup> biannual workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes: mitigating risk through in ternational volcano, earthquake, and science JKASP-2011. Petropavlovsk-Kamchatsky. August 25-30. 2011. P. 303-304.
13. *Nikolaeva A.G., Karpov G.A., Bychkov A.Yu.* Hydrochemical evolution of water in the Karymskoye lake during 1996-2015 after an under water eruption in Kamchatka // *Vulkanologiya i Seismologiya*. 2018. № 2. P. 40-60.
14. *Nikolaeva A.G., Karpov G.A., Lupikina E.G., et al.* Evolution of saline composition in thermal spring waters and Karymskoye lake after the 1996 eruption // Materials of the Annual Conference devoted to the Day of Volcanologist, March 30 – April 1, 2005. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2005. P. 37-47.
15. *Pilipenko G.F., Razina A.A., Fazlullin S. M.* Hydrothermal sources of Ksudach Volcano Caldera // *Volcanol. Seismol.* 2001. № 6. P. 43-57.
16. *Vakin E.A. and Pilipenko G.F.* Hydrothermal Activity in Lake Karymskoe after the 1996 Underwater Eruption // *Vulkanologiya i Seismologiya*. 1998. № 2. P. 3-27.
17. *Yuri Taran, Salvatore Inguaggiato, Carlo Cardellini et al.* Posteruption chemical evolution of a volcanic caldera lake: Karymsky Lake, Kamchatka // *Geophysical Research Letters*. VOL. 40, 5142-5146, doi:10.1002/grl.50961, 2013. P. 5142-5146.

## **Temperature and gas composition of the Avachinsky volcano fumaroles (Kamchatka) in 2013-2018**

**Natalia A. Malik**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia  
maliknataliya@mail.ru*

The results of regular studies of the fumarole of the Avachinsky volcano are presented. The temperature dynamics in 2013–18 is shown high-temperature fumarole. The composition of fumarole gases and its variations in time have been studied.

**Keywords:** Avachinsky volcano, fumarole, volcanic gas, temperature, gas composition

## **Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013-2018 гг.**

**Малик Н.А.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, б. Пийна 9, 683006*

Представлены результаты регулярных исследований фумарол вулкана Авачинский. Показана динамика температур в 2013–18 гг. высокотемпературных фумарол. Изучен состав фумарольных газов и его вариации во времени.

**Ключевые слова:** вулкан Авачинский, фумарола, вулканический газ, температура, состав газа

Авачинский вулкан (2751 м н.у.м.), один из активных вулканов Камчатки, расположен вблизи главных городов полуострова: Петропавловска-Камчатского (25 км) и Елизово (30 км). В историческое время (с 1697 г.) отмечено 14 его извержений. В результате последнего извержения в 1991 г. лава заполнила кратер, образовав так называемую лавовую "пробку". В 2001 г. в результате слабой эксплозивной активизации вулкана, в "пробке" образовалась большая трещина, к которой в настоящее время приурочены два высокотемпературных (>450°C) фумарольных поля – Западное и Восточное (рис. 1). Низкотемпературные (<100°C) газовые выходы и термальные площадки расположены на гребне кратера, контакте лавы 1991 г. со стенками кратера, продолжении трещины 2001 г. на склоны конуса. Во время полевых работ в 2013–2018 гг. основное внимание уделялось исследованиям температуры и состава газов высокотемпературных фумарол.

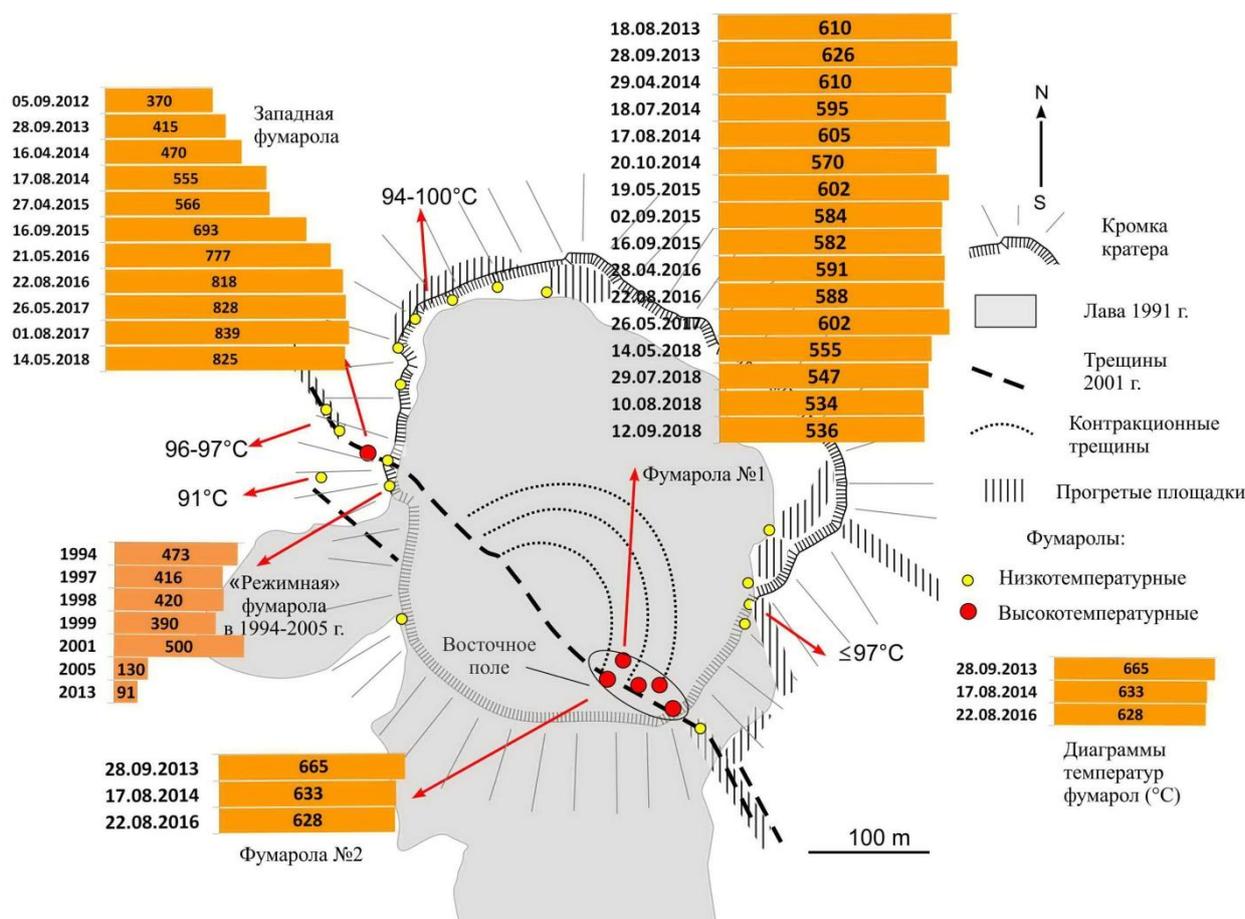


Рисунок 1 – Схема вершины вулкана Авачинский

**Западная фумарола** представляет собой выход газа из глубокой трещины на западном склоне конуса (~10 м вниз от кромки кратера), являющейся продолжением разлома 2001 г. в лавовой пробке. До 2015 г. газовая эмиссия происходила в виде интенсивной струи из трещины, просматривавшейся на 10 м вглубь, сопровождаемая сильным аэродинамическим шумом. Зимой 2014–15 гг. в результате обвалов стенок трещина расширилась в верхней части, а выход высокотемпературной струи был завален, газ стал выходить не единой мощной струей, а через отдельные отверстия в обвалившейся породе, измеренная пирометром температура возросла и достигла 700°C, аэродинамический шум исчез (между 2 и 16 сентября). В мае 2016 г. температура Западной фумаролы впервые была измерена термопарой и составила 777°C [Малик и др., 2017]. Во время последующих обследований в 2016–17 гг. она постепенно возрастала до 818, 828 и 839°C и оставалась примерно на этом уровне в 2018 г. Описанные изменения в состоянии Западной фумаролы отразились на соотношении расходов газа двух высокотемпературных фумарольных полей Авачинского вулкана, определяемых визуально по высоте подъема газовых струй. Данные видеонаблюдений подтвердили эти изменения в соотношении расходов и позволили определить более точно временной интервал изменений как 11 декабря 2014 г. – 21 января 2015 г. В это же время была отмечена небольшая сейсмическая активизация в застройке вулкана, на глубинах -2–2 км [Малик, Некрасова, 2018].

Состав газа изучался в основном на фумаролах **Восточного поля**. Температура режимной фумаролы в 2013–2018 гг. менялась незначительно в пределах 580±45°C с тенденцией к понижению (рис. 1, 2). Состав высокотемпературного газа фумаролы Восточного поля соответствует средним составам вулканических газов островных дуг за исключением более низких содержаний HCl и HF. На окислительно-восстановительных диаграммах (H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O and CO/CO<sub>2</sub>) точки отношений для высокотемпературных газов расположены вдоль линии газового буфера (рис. 3), что говорит о том, что газы отбирались

при равновесной температуре. Точки отношений для низкотемпературных газов тяготеют к гидротермальным породным буферам.

Умеренные изменения состава газа частично коррелируют с его температурой, а также сезоном отбора. Изотопный состав воды газового конденсата режимной fumarолы значительно варьировал от чисто магматического до 50% содержания магматической и метеорной фракции с некоторой зависимостью от сезона отбора пробы и температуры fumarолы (рис. 2). Наиболее "легкие" воды отмечены в пробах конденсата газа, отобранного в теплый сезон года (июль-сентябрь), вероятно благодаря притоку талых вод через все более растрескивающуюся лавовую пробку.

### Выводы

Составы высокотемпературных газов, включая изотопные составы воды, вулкана Авачинский соответствуют средним составам вулканических газов островных дуг. Максимальная температура 839°C была отмечена в Западной fumarоле в 2017 г., где в 2014-2015 гг. произошли наиболее заметные изменения: глубокий выход газовой струи был завален породой обвалившихся стенок, после чего расход газа сократился, а его температура возросла. В то время, температура режимной fumarолы Восточного поля в 2013-2018 гг. менялась в пределах 580±45°C. Умеренные изменения ее газового состава и значительные вариации изотопного состава воды частично коррелируют с температурой газа и сезоном отбора.

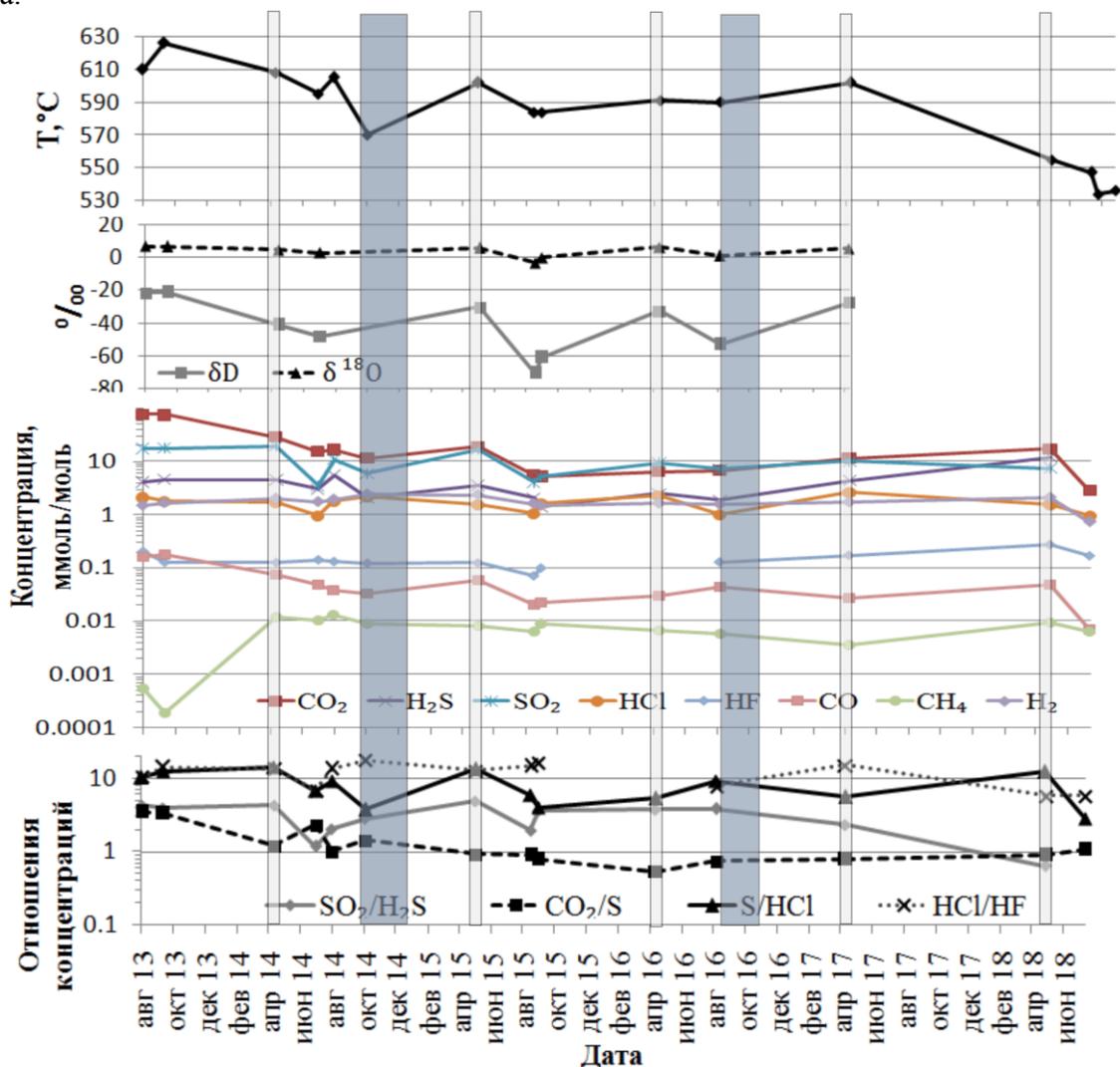


Рисунок 2 – Временные изменения температуры, изотопного состава воды, основных компонентов газа и их отношений высокотемпературной fumarолы вулкана Авачинский. Узкими полосами отмечены результаты анализа проб, отобранных в холодный сезон года (апрель-май), широкими – сейсмические активизации вулкана, выделенные ниже

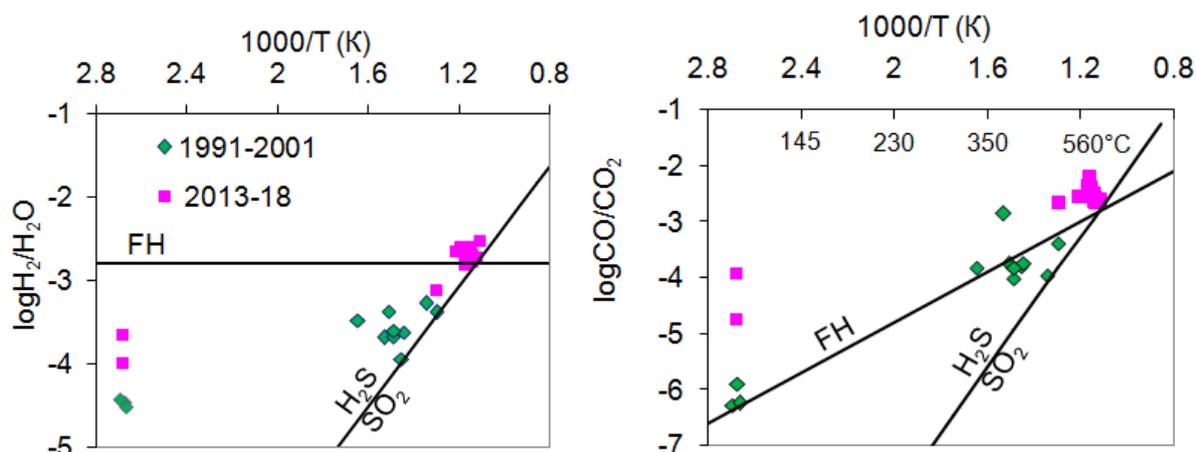


Рисунок 3 – Окислительно-восстановительные диаграммы для фумарольных газов вулкана Авачинский в зависимости от температуры. Проведены линии буферов: FH – фаялит-гематитового,  $H_2S-SO_2$  – газового. Данные для 1991-2001 гг. из [Taran et al., 1997; Малик и др., 2017]

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-55-50005 ЯФ\_а.

### Список литературы

1. Малик Н.А., Зеленский М.Е., Округин В.М. Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013–2016 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 1. С. 21–33.
2. Малик Н.А., Некрасова М.Ю. Динамика активности фумарол вулкана Авачинский в 2013-2017 гг. по данным режимных и видео наблюдений и ее связь с локальной сейсмичностью // Материалы XXI региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29 - 30 марта 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. С. 64-67.
3. Taran Y.A., Cornor C.B., Shapar V.N. et al. Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes, Kamchatka, from 1993 to 1994 // Bulletin of Volcanology. 1997. V. 58. № 8. P. 441–448.

## Water Isotope Studies of the Koryaksky-Avachinsky volcanogenic basin and Paratunsky geothermal fields

Alexey V. Kiryukhin<sup>1,2</sup>, Pavel O. Voronin<sup>1</sup>, Nikita B. Zhuravlev<sup>1</sup>, Andrey Y. Polyakov<sup>1</sup>, Tatyana V. Rychkova<sup>1</sup>, Olga O. Usacheva<sup>1</sup>, S.A. Fedotov<sup>1</sup>, Evgenia V. Chernykh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia

<sup>2</sup> Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003

malgor90@mail.ru

Mechanism of Kamchatka geofluid systems functionality was studied based on the isotopic composition: Paratunsky geothermal area; Koryaksky-Avachinsky volcanogenic basin.

**Keywords:** Geofluids, TOUGH2, CFRAC, Frac-Digger, modeling, hydrothermal, volcano, seismicity

## Исследование изотопного состава вод Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна и Паратунского геотермального месторождения

Кирюхин А.В.<sup>1,2</sup>, Воронин П.О.<sup>1</sup>, Журавлев Н.Б.<sup>1</sup>, Поляков А.Ю.<sup>1</sup>, Рычкова Т.В.<sup>1</sup>, Усачева О.О.<sup>1</sup>, Федотов С.А.<sup>1</sup>, Черных Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский 683006

<sup>2</sup> Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский 683003

Рассматриваются механизмы функционирования геотермальных резервуаров Паратунского и геотермального района; и Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна по результатам исследования изотопного состава воды.

**Ключевые слова:** Геофлюиды, TOUGH2, CFRAC, Frac-Digger, моделирование, гидротермальный, вулкан, сейсмичность

### Паратунская гидротермальная система

Паратунские геотермальные месторождения приурочены к вулканогенным резервуарам в грабенах рек Паратунка и Карымшина, они являются примерами низкотемпературных гидротермальных систем метеорного происхождения.

За прошедшие 40 лет накоплен значительный опыт эксплуатации Паратунского геотермального месторождения. Получены данные по изменению давления в продуктивном резервуаре, температуры и химического состава извлекаемого теплоносителя (общий объем добычи которого за период 1966–2014 гг. составил 321 млн. т), разработаны методы моделирования.

По результатам разведочного бурения, преимущественно до глубины 1000–1500 м, на месторождении выработана гидрогеологическая стратификация: 1 – аллювиальные песчано-гравийно-галечные отложения (заклюают мощный поток холодных грунтовых вод); 2 – нижнечетвертичные алевриты с прослоями тонкозернистых песчаников (водо- и теплоупор) залегают на глубине 40–180 м, их мощность варьирует в пределах 10–150 м; 3 – нижнечетвертичные конгломераты с прослоями алевритов и туфопесчаников (верхний водоносный горизонт термальных вод); 4 – туфопесчаники, туфоконгломераты и туфы алнейской серии (распространены только на Северном участке); 5 – туфогенно-пирокластические породы паратунской свиты (характеризуются наибольшей обводненностью, являются основными термовмещающими); 6 – интрузивные породы (обводнены незначительно, за исключением отдельных тектонических зон).

Четыре последних горизонта объединены в единый напорный водоносный комплекс, с которым связана циркуляция преимущественно трещинно-жильных, пластово-трещинных

термальных и холодных напорных вод. Наличие выдержанного по площади относительного водоупора (нижнечетвертичные алевриты, песчаники, глины) мощностью 10–100 м с глубиной залегания кровли 40–80 м обеспечивает избыточные напоры относительно холодных вод и подпор восходящего конвективного потока термальных вод.

Скважины Нижнего и Северного участков вскрыли более минерализованные термальные воды ( $M\ 1.9\text{--}2.6\ \text{г/л}$ ) хлоридно-сульфатного состава, в отличие от сульфатных вод на других участках месторождения. По характеристикам изотопного состава ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) четко фиксируется дифференциация термальных вод Паратунского геотермального месторождения по участкам: на участках Северном, Нижне-Паратунском и Микижа более легкие воды ( $-116\text{‰} < \delta D < -110\text{‰}$ ,  $-16\text{‰} < \delta^{18}O < -15\text{‰}$ ), на Среднем и Промежуточном участках происходит некоторое утяжеление ( $-110\text{‰} < \delta D < -104\text{‰}$ ,  $-15.4\text{‰} < \delta^{18}O < -14.3\text{‰}$ ). Речная вода (р. Карымшина и р. Паратунка), характеризующая локальные бассейны водосбора, значительно более тяжелая, чем термальные воды ( $-100\text{‰} < \delta D < -95\text{‰}$ ,  $-14.3\text{‰} < \delta^{18}O < -13.2\text{‰}$ ). Изотопному составу термальных вод в наибольшей степени соответствует вода (-112‰ <  $\delta D$  < -107‰, -15.8‰ <  $\delta^{18}O$  < 14.2‰) из тающего ледника в кратере Мутновского вулкана (+1550 м абс.), она близка составу термальной воды на Среднем, Промежуточном участках Паратунского месторождения и на Верхне-Паратунском месторождении. Вода Нижнего и Северного участков еще более легкая.

Исходя из результатов анализа изотопного состава воды, можно полагать, что область водного питания Паратунского геотермального месторождения (в естественных условиях) не включает локальные водосборные бассейны в пределах самих месторождений, она должна быть приподнята до отметок ледников и многолетних снежников. Области с абсолютными отметками выше 1000 м, где фиксируется распространение ледников (Виллю-чинский вулкан, 2175 м абс.) и многолетних снежников (Виллючинский вулкан, локальные приводораздельные области кальдеры в верхнем течении р. Карымшина), это единственно возможные области водного питания Паратунских геотермальных месторождений.

Инфильтрационное питание из постройки Виллючинского вулкана выражается в облегчении изотопного состава воды Нижнего и Северного участков Паратунского геотермального месторождения ( $\delta D = -113\text{‰}$ ,  $\delta^{18}O = -15.5\text{‰}$ ) по сравнению с утяжеленными термальными водами Верхне-Паратунского геотермального месторождения и Среднего участка Паратунского геотермального месторождения ( $\delta D = -107\text{‰}$ ,  $\delta^{18}O = -14.7\text{‰}$ ), подпитываемыми, вероятно, также инфильтрационными водами из центрального сектора «кальдеры Леонова».

Хорошо выраженные в орографии структуры северо-северо-западного, субмеридионального и северо-восточного простирания могут вмещать каналы, по которым холодная вода тающих ледников и снежников вулкана и кальдеры проникает через жерла потухших вулканов в разломы фундамента на глубины 4–5 км. Прогреваясь на протяжении 20–30 км за счет кондуктивного теплового потока и локальных магматических питающих систем потухших вулканов, эта вода приходит в Паратунские продуктивные геотермальные резервуары уже с температурой 80–100 °С. Площадь постройки только Виллючинского вулкана с отметками выше +900 м абс. составляет 19 км<sup>2</sup>, из которых значительную часть занимают многолетние снежники и ледники, что при увеличивающейся с высотой интенсивности атмосферных осадков более 5000 мм [2] может обеспечить сток воды с расходом более 3 м<sup>3</sup>/с. Если 15% от этого стока преобразуются в подземный сток, то этого достаточно для обеспечения водного питания Паратунских геотермальных месторождений. Немаловажно также приподнятое на 1–2 км положение постройки Виллючинского вулкана, что обеспечивает повышенное гидродинамическое давление (+100 – +200 бар), гидроразрыв, раскрытие и реактивацию сдвиговых трещин и разломов, повышение проницаемости по пути фильтрации.

#### **Гидротермальные системы Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна.**

Авачинско-Корякский вулканогенный бассейн площадью 2530 км<sup>2</sup> включает пять четвертичных вулканов (два из которых Авачинский (2750 м абс.) и Корякский 3456 м абс.)

активны), суббассейны вулканогенно-осадочных неоген-четвертичных отложений мощностью до 1,4 км. Бассейн расположен в депрессии, сформированной в верхней части фундамента мелового возраста, характеризующейся низким температурным градиентом 24°/км. Фундамент бассейна сложен верхнемеловыми отложениями K<sub>2</sub>, которые представлены метаморфическими породами с низкой пористостью и проницаемостью в целом, однако присутствуют локальные зоны трещиноватости, из которых при испытании скважин получены притоки воды с дебитами до 6 кг/с в интервале глубин 1438–1490 м (скв. Е1). Неоген-нижнечетвертичный водоносный комплекс сложен пирокластическими и вулканогенно-осадочными образованиями. Значения пористости довольно высокие: 0,36÷0,48, удельные дебиты скважин до 0,01 л/(с·м) (скв. ГК-1, Пиначевская). Водоносный комплекс Пиначевского экструзивного массива Q<sub>1-2</sub> сложен экструзиями андезитов и риолитов и включает жерловые образования андезитов, дацитов и риолитов (мощность > 200–500 м). По данным лабораторных исследований пористость 0,12, проницаемость 24 мД. Вложенный артезианско-вулканогенный бассейн (АВБ) включает водоносный комплекс водно-ледниковых образований: голоценовые аллювиальные отложения, верхнеплейстоценово-голоценовый морской и аллювиально-морской горизонты, верхнеплейстоценовый ледниковый и водно-ледниковый комплекс, водоносный голоценовый пролювиальный и делювиально-пролювиальный комплекс. По данным опробования скважин Быстринского месторождения подземных вод диапазон проницаемости от 10 до 3000 мД. Корякский и Авачинский вулканы (Q<sub>3-4</sub>) сложенные андезибазальтами и базальтами – формируют область питания подземных вод вулканогенного бассейна.

Интервалы опробования глубоких скважин, вскрывших фундамент Корякско-Авачинского бассейна (K<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>-N<sub>1</sub>) характеризуются химическим составом соответствующим разбавлению океанической седиментационной воды за счет инфильтрации метеорных вод. Это Cl-Na воды с незначительными содержаниями HCO<sub>3</sub>, Ca, Mg и SO<sub>4</sub>. По газовому составу флюиды фундамента вулканического основания (кроме северного склона Корякского вулкана) характеризуются повсеместным распространением метана (около 70 об.%), обнаруженного в скважинах на Радыгской площади (скв. P3), скважинах Кеткинского геотермального месторождения (K1 и др.), по юго-восточной периферии Пиначевского экструзивного массива (скв. ГК1, Пиначевские источники) и к юго-западу от Корякского вулкана (скв. Е1). Наиболее ярким примером является скв. P3, вскрывшая в интервале глубин 366–455 м газовую залежь под давлением 24,2 бар. При опробовании этой скважины после углубления в полном интервале 366-1503 м получена продукция 3,2 кг/с воды и 4,0 л/с газа при температуре излива 18°С.

Условия водного питания Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна изучены с использованием данных по изотопному составу воды ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) и углерода в свободном газе  $\delta^{13}C$ . Изотопный состав ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) термоминеральных источников (Корякские Нарзаны, Изотовские и Пиначевские) и скважин Быстринского и Елизовского месторождений подземных вод указывает на то, что область водного питания находится на отметках от +2000 до +2500 м абс. (ледники Корякского и Авачинского вулканов). Водное питание Чистинских Нарзанов происходит из центральной части Пиначевского экструзивного массива (вулканы Арик и Ааг) с отметок от 800 до 500 м абс.

Изотопный состав углерода  $\delta^{13}C$  в CO<sub>2</sub> в пробах свободного газа источников на северном склоне Корякского вулкана (Корякских нарзанов и Изотовских) находится в диапазоне -9,0 ÷ -6,9 ‰, то есть в диапазоне Корякских и Авачинских фумарол (см. ниже), что указывает на магматическое происхождение CO<sub>2</sub> в вышеупомянутых источниках. Таким образом, углекислые источники на северо-западном склоне Корякского вулкана формируются в результате смешения магматических газов и тающих вод ледников. Гидротермальный резервуар под северным склоном Корякского вулкана характеризуется температурами от 253 до 333°С и газосодержанием CO<sub>2</sub> до 3 г/кг (Корякский Нарзан).

По изотопному составу углерода  $\delta^{13}C$  в CH<sub>4</sub> в пробах свободного газа метановые скважины Кеткинского геотермального месторождения (K1,  $\delta^{13}C = -34$  ‰) и Радыгинской

площади (РЗ,  $\delta^{13}\text{C} = -61 \text{ ‰}$ ) – значительно отличаются. Газ из скважины К1 формируется в более высокотемпературных условиях, чем газ из скважины РЗ, где значительная доля метана является "болотным метаном" микробиологического происхождения. Интересно, что газ из скважин газоконденсатных месторождений на западе Камчатке также находится в этом диапазоне (Нижне-Квакчикское  $-36,9 \div -38 \text{ ‰}$ , Кшукское  $-43,1 \text{ ‰}$ ) (В.Ю. Лаврушин, личное сообщение 2014 г.).

Возможно, что обогащение вулканогенного бассейна метаном происходит в результате термического и геомеханического воздействия в зонах внедрения магмы, питающей Корякский и Авачинский вулканы (резервуары К и А) на вмещающие вулканогенно-осадочные породы, содержащие органическое вещество разнообразного происхождения. Тем не менее, низкие значения  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{CO}_2$ ) ( $-49,7 \div -16,8 \text{ ‰}$ ) в метановых скважинах показывают, что значительная доля  $\text{CO}_2$  здесь немагматического происхождения, и парагенетически связана с метаном.

Химический и изотопный состав вулканических газов из fumarol Авачинского и Корякского вулканов описан Ю.А. Тараном [12]: эти газы характеризуются диапазоном изотопного состава, отражающим смесь воды магматического и метеорного происхождения, магматического  $\text{CO}_2$  ( $-58 \text{ ‰} < \delta\text{D} < -30 \text{ ‰}$ ,  $-0,1 \text{ ‰} < \delta^{18}\text{O} < +7 \text{ ‰}$ ,  $-11,8 < \delta^{13}\text{C} < -5,2$ ), высокая концентрация метана (до 0,3–0,6 ммоль/моль) указывает на его приток из водно-метановых бассейнов в фундаменте вулканов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 18-05-00052.*

#### **Список литературы**

1. А. В. Кирюхин, Н. П. Асаулова, Л. А. Ворожейкина, П. О. Воронин, Н. В. Обора, П. А. Кирюхин Условия формирования и моделирование эксплуатации Паратунского геотермального месторождения (Камчатка). Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2017, № 3, с. 16–30.
2. Kiryukhin A.V., Vorozheikina L.A., Voronin P.O., Kiryukhin P.A. Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia // Geothermics 70 (2017) 47–61.
3. A. Kiryukhin, V. Lavrushin, P. Kiryukhin, P. Voronin Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia). Geofluids, vol. 2017, Article ID 4279652, 21 p., 2017. doi:10.1155/2017/4279652.

**SECTION II. SEISMICITY IN GEOFLUID VOLCANIC AND  
HYDROTHERMAL SYSTEMS.  
MAGMATIC FEEDING SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES**

**РАЗДЕЛ II. СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ  
ВУЛКАНИЧЕСКИХ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.  
МАГМАТИЧЕСКИЕ ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ**

УДК 551.21+ 552.11+550.34

**Magmatic plumbing systems of the Tolbachik areal volcanic field**

**Yulia A. Kugaenko<sup>1</sup>, Anna O. Volynets<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Kamchatka Branch, Petropavlovsk-Kamchatsky  
683006, Russia*

*<sup>2</sup>Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia  
ku@emsd.ru; a.volynets@gmail.com*

Tolbachinsky Dol (TD) is a large areal volcanic field (AVF), belonging to the Klyuchevskaya volcanic group in Kamchatka. Eruptive centers in TD are concentrated along the elongated zone of the deep fault (rift); monogenetic edifices tend to cluster. Petrological investigations show polymagmatic origin of individual eruptive centers. Eruptive centers of different composition are unevenly distributed within the AVF both in space and time. Tolbachik AVF is superimposed to Plosky Tolbachik stratovolcano. Most likely, at the end of Holocene Plosky Tolbachik already serves as one of the eruptive centers of this AVF. Geophysical data confirm its subordinate role with respect to the superimposed AVF. New instrumental seismic data allow us to complement and detail the model of Tolbachinsky Dol magma plumbing system, on a base of quantitative estimates. The results of the microseismic sounding and detailed seismic tomography experiment revealed parametric anomalies which can be interpreted as elements of the magma plumbing system. Tolbachik AVF has a complicated magma plumbing system, which can be visualized as a superposition of subvertical and sublateral magma conduits. Our research reveals a system of independent magma conduits and magmatic reservoirs. Finally, there are no pronounced subvertical channels above the crystalline basement level. This conclusion contradicts the existing ideas of simple subvertical magma supplying channels, feeding the monogenetic centers. Petrological data confirm the existence of the complicated magmatic system with mantle feeding and open fractionation in the crustal reservoirs.

**Keywords:** Monogenetic volcanism, areal volcanism, magma reservoir, magma conduit, microseismic sounding, Tolbachinsky Dol, Kamchatka

**Магматическая питающая система Толбачинского поля  
ареального вулканизма**

**Кугаенко Ю.А., Вольнец А.О.**

*Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский,  
Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, Пийпа-9, Петропавловск-Камчатский 683006*

Толбачинский дол (ТД) это крупное поле ареального вулканизма, расположенное в Ключевской группе вулканов на Камчатке. Эруптивные центры ТД сконцентрированы вдоль вытянутой зоны глубинного разлома; моногенные центры расположены кластерами. Петрологические исследования выявили полимагматическое происхождение отдельных эруптивных центров. Эруптивные центры различного состава расположены неравномерно и во времени, и в пространстве. ТД наложен на стратовулкан Плоский Толбачик. Вероятно, в конце голоцена Плоский Толбачик выступает в качестве одного из эруптивных центров ареальной зоны вулканизма. Геофизические данные подтверждают его подчиненную роль по отношению к наложенной ареальной зоне. Новые инструментальные сейсмические данные позволяют дополнить и детализировать модель магматической питающей системы Толбачинского дола на базе количественных оценок. Результаты

микросейсмического зондирования и детального сейсмотомографического эксперимента выявили параметрические аномалии, которые могут интерпретироваться как элементы магматической питающей системы. Толбачинское поле ареального вулканизма характеризуется сложнопостроенной магматической питающей системой, сложенной субвертикальными и сублатеральными магмопроводами; существует серия независимых магматических резервуаров и подводящих каналов. Субвертикальные каналы над уровнем кристаллического фундамента отсутствуют. Эти выводы противоречат ранее высказанным идеям о простых субвертикальных подводящих каналах, питающих моногенные вулканы. Петрологические данные подтверждают существование сложной магматической системы с мантийным питанием и фракционированием в коровых резервуарах.

**Ключевые слова:** Моногенный вулканизм, ареальный вулканизм, магматический очаг, подводящий канал, микросейсмическое зондирование, Толбачинский дол, Камчатка

Tolbachinsky Dol is a large (length ~70 km, area 875 km<sup>2</sup>) volcanic field built by products of numerous monogenetic eruptions, happened throughout Holocene times. It is situated in the Central Kamchatka Depression in Kamchatka and belongs to Klyuchevskaya volcanic group. Tolbachinsky Dol adjoins two stratovolcanoes (Ostry and Plosky Tolbachik) and consists of two flanks, located at the SSW and NE slopes of Plosky Tolbachik edifice. There are more than 120 cinder cones with a height up to 300 m agl within Tolbachinsky Dol; they were formed here during the last 10 Ka, and are located along the SW-NE fissure and tend to cluster: 80% of the cones are concentrated in the narrow band 3-4 km wide (Churikova et al., 2015b). Tolbachinsky Dol is composed by the lavas of contrast composition: (1) high-Al, high-K basalts and basaltic andesites, which were a main type of volcanic products of Tolbachinsky Dol from the beginning of Holocene up to 2 Ka, (2) since 2 Ka high-Mg, medium-K basalts appeared at the surface, as well as (3) the transitional varieties (intermediate and K-rich high-Mg basalts) (Churikova et al., 2015a, b). During the last eruption in 2012-2013 trachybasaltic andesites with high titanium and alkali content were produced (Volynets et al., 2015). Tolbachinsky Dol crosses a stratovolcano (Plosky Tolbachik) with the similar (high-Mg and high-Al) composition of its products (Churikova et al., 2015a). It was formed at the beginning of Holocene and to the time of fissure eruptions of 1975 and 2012 already lost its activity (Flerov et al., 2015). Due to the two big eruptions happened here during the last 50 years (Great Fissure Tolbachik Eruption in 1975-76 and Tolbachik fissure eruption in 2012-2013) this area is very well studied by a variety of methods; it is probably one of the best-studied fields of monogenetic volcanoes in the world and thus it may serve as an etalon object for testing various hypotheses on the mechanisms and reasons of a contemporary volcanic activity and relationships of monogenetic and polygenetic volcanism.

According to the results of numerous studies, summarized in (Kugaenko, Volynets, 2018), Tolbachinsky Dol has several distinctive features (table), which are not typical for individual monogenetic edifices or polygenetic volcanoes, but are in a good agreement with the new classification suggested by Nemeth and Keresturi (2015), which implies separation of monogenetic volcanic fields from monogenetic type of activity sensu stricto. (1) Eruptive centers in Tolbachinsky Dol are concentrated along the elongated zone of the deep fault (rift); monogenetic edifices tend to cluster. (2) Petrological investigations show polymagmatic origin of individual eruptive centers (expressed as eruptions of the magmas with contrast composition and/or multiple sources involved in magma generation). High-Mg basalts are produced by fractionation of the primary mantle melts; high-K high-Al basalts and trachybasaltic andesites of 2012-2013 eruption are the result of the long-term evolution of this magmatic system, with fractionation of Mg basaltic magmas in situ, while basalts with intermediate composition are produced by mixing between high-Al and high-Mg magmas (Portnyagin et al., 2015). (3) Eruptive centers of different composition are unevenly distributed within this volcanic field both in space and time. (4) Tolbachinsky Dol is superimposed to Plosky Tolbachik stratovolcano. Most likely, at the end of Holocene Plosky Tolbachik already serves as one of the eruptive centers of this monogenetic volcanic field. Geophysical data confirm its subordinate role with respect to the superimposed monogenetic volcanic field (no crustal reservoir was revealed under Plosky Tolbachik at seismic tomography and microseismic survey experiments by Koulakov et al. (2017) and Kugaenko et al. (2018)). (5) New

instrumental seismic data allow us to complement and detail the model of Tolbachinsky Dol magma plumbing system, on a base of quantitative estimates. The results of the microseismic sounding (2010-2015, Kugaenko et al., 2013) and detailed seismic tomography experiment (2014-2015, Koulakov et al., 2017) revealed parametric anomalies which can be interpreted as elements of the magma plumbing system (Fig. 1). Tolbachinsky Dol has a complicated magma plumbing system, which can be visualized as a superposition of subvertical and sublateral magma conduits. Our research reveals a system of independent magma conduits and magmatic reservoirs. Finally, there are no pronounced subvertical channels above the crystalline basement level. This conclusion contradicts the existing ideas of simple subvertical magma supplying channels, feeding the monogenetic centers. Petrological data confirm the existence of the complicated magmatic system with mantle feeding and open fractionation in the crustal reservoirs.

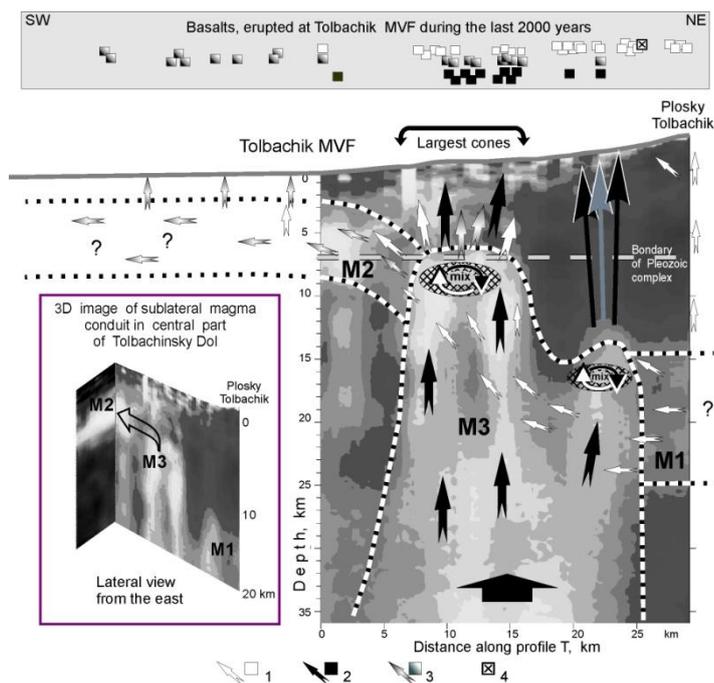


Figure 1 – The conceptual scheme of magma plumbing of Tolbachik areal field on a base of vertical cross section along the microseismic profile. Arrows indicate possible pathways for basaltic magmas of different composition according to the model of magma fractionation and mixing (Portnyagin et al., 2015). The scheme provides possible explanation for the uneven spatial distribution of the basalts of different composition in TD. Legend: 1-3 – basalts: 1 - High-Al, 2 – High-Mg, 3 – intermediate; 4 – trachybasaltic andesites. M1, M2, M3 – elements of magma plumbing system under central part of Tolbachik MVF according to MSM results (Kugaenko et al., 2013): M1 – sublateral magma conduit at 15-25 km depth, going under Plosky Tolbachik; M2 – sublateral magma conduit at 4-8 km depth, going along the rift from the central to the southern part of TD; M3 – trans-crust area of magma conductivity (dyke complex) under the central part of TD, under the chain of the highest

cinder cones.

Table 1 – Principal reasons for classification of the areal volcanic fields as a special type of volcanism based on Tolbachinsky Dol example

	Composition of magma	Type of volcanic edifices in the field	Areal distribution of eruptive centers	Polygenetic volcanic edifices	Magmatic plumbing system
<b>Monogenetic volcanic fields in the old classification</b>	constant	monogenetic	separate eruptive centers	absent	primitive
<b>Tolbachinsky Dol – a possible example of the areal volcanic field</b>	contrast	monogenetic and polygenetic	clustering of eruptive centers	present and captured by AVF	complex system of subvertical and sublateral magma conduits

Therefore, characteristics of Tolbachik monogenetic volcanic field strongly support the separation of monogenetic volcanic fields from monogenetic and polygenetic volcanoes sensu strict in the classification suggested by Nemeth and Keresturi (2015). In Russian (mainly, but not exclusively) literature there is a special term for this type of volcanic activity – “areal volcanism”.

Taking into account all the facts stated above, which come into conflict with the definition of the monogenetic volcanism *sensu stricto*, we believe it might be prudent to accept term “areal volcanism” or “areal volcanic fields” as defining this special type of volcanic activity, because it allows eliminating confusion caused by genetic meaning of the used terms (table 1).

*The work is supported by IVS FEB RAS (theme 0282-2016-0004), Kamchatka Branch of GS RAS (theme AAAA-A16-116070550058-4) and RFBR grant #17-05-00112.*

## References

1. Churikova, T.G., Gordeychik, B.N., Iwamori, H., et al. 2015a. Petrological and geochemical evolution of the Tolbachik volcanic massif, Kamchatka, Russia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 307: 156–181.
2. Churikova, T. G., Gordeychik, B. N., Edwards, B. R., et al. 2015b. The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012–2013 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 307: 3-21.
3. Flerov, G.B., Anan'ev, V.V., Ponomarev, G.P. 2015. The petrogenesis of rocks of the Ostryi and Ploskii volcanoes and the relationship between volcanic occurrences of basaltic and trachybasaltic magmas in the Tolbachik Dol area, Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology* 9 (3): 162-181.
4. Koulakov, I., Abkadyrov, I., Arifi, N., et al. 2017. Three different types of plumbing systems beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny and Klyuchevskoy in Kamchatka. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 122 (5): 3852–3874.
5. Kugaenko, Yu. A., Saltykov, V. A., Gorbatikov, A. V., Stepanova, M. Yu., 2018. Deep structure of the zone of Tolbachik fissure eruptions, Kamchatka, Klyuchevskoy Volcano Group: evidence from a complex of geological and geophysical data. *Izv., Phys. Solid Earth*, 54 (3): 60-83.
6. Kugaenko, Yu.A., Saltykov, V.A., Gorbatikov, A.V., Stepanova, M.Yu. 2013. Deep structure of the North Vent area, Great Tolbachik Fissure Eruption of 1975–1976, Kamchatka: Evidence from low-frequency microseismic sounding. *Journal of Volcanology and Seismology* 7(5): 313–327.
7. Kugaenko, Yu. A., Volynets, A.O. 2018. Magmatic plumbing systems of the monogenetic volcanic fields: A case study of Tolbachinsky Dol, Kamchatka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, in press. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.015>
8. Nemeth, K., Kereszturi, G. 2015. Monogenetic volcanism: personal views and discussion. *International Journal of Earth Sciences*, 104: 2131-2146.
9. Portnyagin M., Duggen S., Hauff F., et al. 2015. Geochemistry of the Late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: towards quantitative modeling of subduction-related open magmatic systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 307: 133-155.
10. Volynets, A., Edwards, B., Melnikov, B., et al. 2015. Monitoring of the volcanic rock compositions during the 2012–2013 fissure eruption at Tolbachik Volcano, Kamchatka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 307: 120-133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.014>

## **Water level changes in the well E-1 as an indicator of geodynamic conditions in Koryaksky-Avachinsky volcano-tectonic depression, Kamchatka**

**Galina N. Kopylova, Svetlana V. Boldina, E.G. Chubarova**

*Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Kamchatka Branch, Petropavlovsk-Kamchatsky  
683006, Russia*

*boldina@emsd.ru; gala@emsd.ru*

The features and possible mechanisms of long-term water level raising and lowering in the E-1 well are considered in comparison with earthquakes,  $M_w \approx 7-8$  in the Kamchatka seismic focal zone and the seismotectonic and phreato-magmatic activity in the area of Koryaksky volcano.

**Keywords:** well, water level, earthquake, volcanic eruption, precursor

## **Изменения уровня воды в скважине E-1 как показатель геодинамического состояния среды Корякско-Авачинской вулкано-тектонической депрессии, Камчатка**

**Копылова Г.Н., Болдина С.В., Чубарова Е.Г.**

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Россия*

Рассматриваются особенности и возможные механизмы трендов повышения и понижения уровня воды в скв. E-1 в сопоставлении с сильными  $M_w \approx 7-8$  землетрясениями в Камчатской сейсмофокальной зоне и режимом сеймотектонической и фреато-магматической активности района влк. Корякский.

**Ключевые слова:** скважина, уровень воды, землетрясение, вулканическое извержение, предвестник

### **Введение**

Территория Камчатского края характеризуется высоким уровнем сейсмической и вулканической активности. Здесь функционирует система геофизического мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений в составе сетей сейсмических станций, пунктов геофизических и др. видов наблюдений; информационных ресурсов – каталогов землетрясений, баз данных наблюдений и программных средств их обработки. Результаты оперативной обработки данных по отдельным видам наблюдений представляются в специализированные советы по прогнозу землетрясений и извержений вулканов в форме заключений о развитии сейсмической и вулканической активности и возможности возникновения сильных землетрясений в Камчатском регионе [7, 8].

Наблюдения за параметрами подземных вод в скважинах представляют один из компонентов системы геофизического мониторинга и прогнозирования землетрясений в Камчатском крае. Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) проводит многолетние (1987-2018 гг.) наблюдения в скважине E-1 с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений и других сигналов геодинамической активности в изменениях уровня воды. Скв. E-1 расположена в пределах Корякско-Авачинской вулкано-тектонической депрессии (К-А ВТД) в 10 км к ЮЗ от действующего влк. Корякский. Последнее фреато-магматическое извержение влк. Корякский происходило в 2008-2009 гг. [6]. Подавляющее большинство сильных землетрясений с величинами магнитуд  $M_w$  до 8-9 происходит в Камчатской сейсмофокальной зоне (КСФЗ) [7]. Расстояние от скв. E-1 до КСФЗ составляет  $\geq 100$  км.

Скв. E-1 вскрывает в диапазоне глубин 625-648 м в гидродинамической зоне затрудненного водообмена солоноватые воды с присутствием газа метаново-азотного состава в низкопористых (пористость 5-6 %), слабоводообильных (водопроводимость  $0.005 \text{ м}^2/\text{сут}$ )

туфх неогенового возраста. Более подробные данные о скв. Е-1 и цифровом оборудовании, используемом для регистрации уровня, температуры и электропроводности подземной воды с периодичностью 5 мин., приводятся в [2, 5] и <http://www.emsd.ru/lgi/places/>.

В режиме скв. Е-1 проявляются тренды повышения и понижения уровня воды продолжительностью 3-6 лет с амплитудами от первых десятков см до 1.5 м со средней скоростью  $\leq 0.1$  см/сут (рис. А). На фоне таких трендов выделяются менее продолжительные вариации уровня воды, вызванные подготовкой и реализацией землетрясений с  $M_w \geq 6.0$  на эпицентральных расстояниях  $d_e$  до 350 км. Обычно такие вариации уровня включают последовательное проявление гидрогеодинамического предвестника в форме понижения уровня с повышенной скоростью в течение недель - месяца до землетрясения и повышение уровня воды после землетрясения (постсейсмический эффект) (рис. В) [2, 4]. В 2006-2009 гг., в период подготовки и извержения влк. Корякский, наблюдался тренд повышения уровня воды с повышенной скоростью (рис. Б). Такой тренд рассматривался в [4] как реакция давления подземных вод на деформацию объемного сжатия водовмещающих пород при возникновении источника повышенных напряжений в районе вулкана.

### **Эффекты подготовки сильных землетрясений КСФЗ в изменениях уровня воды**

Основными видами сигналов в изменениях уровня подземных вод, используемых при оценке опасности сильных землетрясений, являются гидрогеодинамические предвестники (ГП). В изменениях уровня воды в скв. Е-1 выделены два типа гидрогеодинамических предвестников: **ГП\_I** с временем упреждения от суток до десятков суток [4, 5, 8] (рис. В) и **ГП\_II** с временем упреждения до месяцев - нескольких лет [8] (рис. А).

**ГП\_I** проявляется в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью в течение суток-месяца перед землетрясениями с  $M_w \geq 5.0$  на расстояниях  $d_e \leq 350$  км (рис. А, В). Регулярная повторяемость **ГП\_I** перед такими землетрясениями (более 70% случаев), а также улучшение статистической связи между проявлениями **ГП\_I** с последующими землетрясениями с ростом величин их магнитуды, позволяют использовать этот вид предвестника для оценки времени возникновения землетрясений с заблаговременностью сутки-первые недели. С начала 2000-х гг. **ГП\_I** используется для составления заключений о возможности возникновения сильных землетрясений в Камчатском регионе с упреждением до одного-двух месяцев [4, 5, 7, 8]. В качестве примера на рис. В показаны изменения уровня в скв. Е-1 в период землетрясения 28.02.2013 г.,  $M_w = 6.8$ . В прогнозном заключении Г.Н. Копыловой от 1 февраля 2013 г. указывалось, что *“в течение времени 1-2 месяца повышена вероятность возникновения землетрясения с  $M_w \geq 5.0$  на расстоянии до 350 км от скважины”*. Землетрясение 28 февраля 2013 г. соответствовало прогнозу от 1 февраля по величине магнитуды, по времени и по местоположению, и этот прогноз признан Камчатским филиалом Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС) оправдавшимся, также как и ряд прогнозов других сильных камчатских землетрясений.

Тренды длительного понижения уровня воды с повышенной скоростью (**ГП\_II**) предшествовали и сопровождали проявления групп сильных землетрясений на прилегающем участке КСФЗ в 1992-1997 гг. (шесть событий с  $M_w = 6.9-7.8$  на эпицентральных расстояниях до 300 км [2]) и в 2013-2017 гг. (более 20-ти сильных землетрясений с максимальными магнитудами  $M_w = 6.8-8.3$  на эпицентральных расстояниях до 350 км). На рис. А показано развитие тренда понижения уровня воды с декабря 2011 по июль 2017 гг. Мы полагаем, что такие длительные понижения уровня отражают геодинамические обстановки роста напряженного состояния среды К-А ВТД, предшествующие усилению сейсмической активности в КСФЗ и возникновению землетрясений с  $M_w \approx 7-8$ . В качестве механизма таких долговременных понижений уровня воды предполагается увеличение трещинно-поровой емкости водовмещающих пород при развитии в них дилатансии и, возможно, фазовых изменениях в системе «вода – газ» в условиях замедленного водообмена подземных вод [4, 8].

Перед сильнейшим Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г.,  $M_w = 7.8$ ,  $d_e = 200$  км (КЗ) в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 проявлялся ГП в течение трех недель в форме синхронных понижений уровня воды с амплитудами -1 см и -11 см. Проявление этого вида ГП

объясняется в [3] объемным расширением водовмещающих пород в районах скважин с амплитудой  $D=7 \cdot 10^{-8}$  вследствие асейсмических движений в области будущего очага.

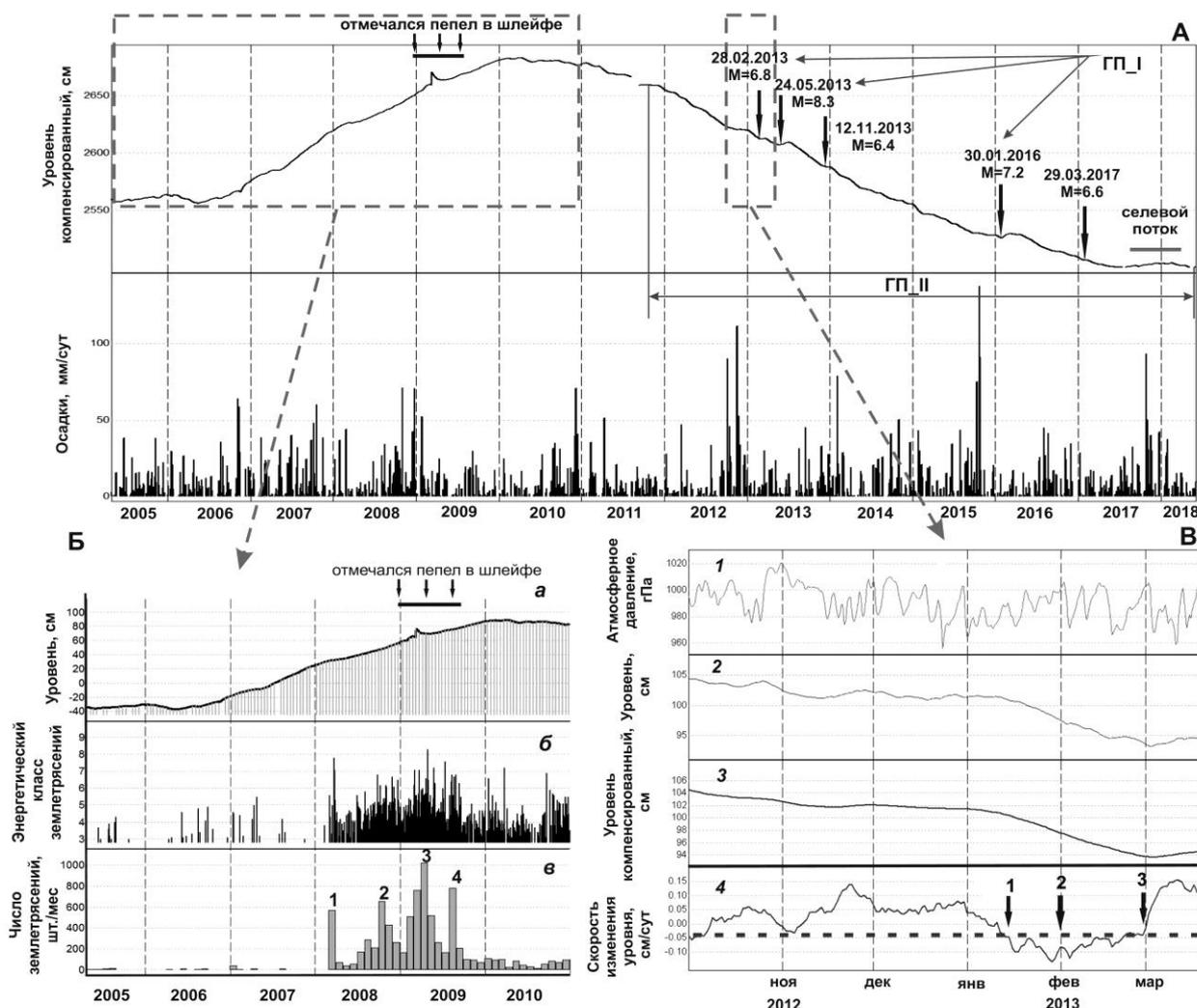


Рисунок А – Изменения уровня воды в скважине E-1 в 2005-2018 гг. в сопоставлении с осадками: пунктиром выделены фрагменты, показанные на рис. Б – повышение уровня воды в 2006-2009 гг. в связи с активизацией влк. Корякский и на рис. В – проявление гидрогеодинамического предвестника ГП\_I. Понижение уровня воды в 2012-2018 гг. (ГП\_II) выделено горизонтальной стрелкой; вертикальными стрелками показаны землетрясения с  $M_w \geq 6.5$  в радиусе до 350 км от скважины.

Б – тренд повышения уровня воды в 2006 -2009 гг. (а) в сопоставлении с сейсмичностью (б) и активностью влк. Корякский; горизонтальной линией на рис. а показано время фреатического извержения; в – суммарное за месяц количество землетрясений с  $K_S \geq 4.0$  в районе влк. Корякский.

В – проявление гидрогеодинамического предвестника ГП\_I перед землетрясением 28 февраля 2013 г.,  $M_w=6.9$ : 1 и 2 – данные регистрации атмосферного давления и уровня воды, 3 – среднесуточные изменения уровня с компенсированными баровариациями, 4 – суточная скорость изменения уровня воды; на графике 4 стрелками показаны: 1 – 16 января 2013 г., начало проявления ГП\_I; 2 – 1 февраля 2014 г., дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС; 3 – 28 февраля 2013 г., дата землетрясения; горизонтальная пунктирная линия – пороговое значение суточной скорости изменений уровня воды.

### Эффекты вулканической активности в изменениях уровня воды

В связи с подготовкой и реализацией фреато-магматического извержения влк. Корякский проявлялся тренд повышения уровня воды с повышенной скоростью с середины 2006 по 2009 гг. Повышение уровня началось за 1.5 года до сейсмической активизации (рой землетрясений с  $K_S \leq 8.3$ ) и за 2.5 года до извержения [4] (рис. А, Б). При этом во время повышения уровня воды (рис. Б) наблюдалось ослабление чувствительности

скважины к процессам подготовки землетрясений в КСФЗ, связанных с поддвигом Тихоокеанской океанической плиты под Охотоморскую плиту континентального типа. Такой эффект проявлялся в 2007-2009 гг. в отсутствие ГП\_I перед землетрясениями с  $M_w \approx 5.0-5.5$ . Чувствительность скважины к процессам подготовки субдукционных землетрясений восстановилась в 2010 г. после окончания извержения и прекращения повышения уровня воды с повышенной скоростью.

Мы полагаем, что продолжавшееся 3.5 года повышение уровня воды было вызвано ростом давления подземных вод вследствие объемного сжатия водовмещающих пород при возникновении и действии источника повышенных напряжений непосредственно в районе влк. Корякского. Кроме повышения уровня воды в скв. Е-1, другим признаком существования источника повышенных напряжений является усиление слабой сейсмичности в 2006-2009 гг. (рис. Б), маркирующей зону субмеридионального простираения в пределах К-А ВТД, а также слабое фреатическое эксплозивное извержение. С учетом амплитуды повышения уровня воды в 2006-2009 гг (1.22 м) и упругих параметров водовмещающих пород рост давления подземных вод во время действия источника повышенных напряжений в районе влк. Корякский составил 12.2 кПа или 0.12 бар. Величина деформации объемного сжатия водовмещающих пород в районе скважины за все время повышения уровня -  $\Delta \epsilon = -(4.1-9.9) \cdot 10^{-6}$  [4]. Вероятной причиной сжатия водовмещающих пород могли быть тектонические напряжения вследствие формирования субмеридиональной раздвиговой зоны в земной коре в районе влк. Корякский [4, 6] и инъекции магмы в его очаг [1].

### **Заключение**

Многолетние наблюдения за вариациями уровня воды показали уникальную чувствительность гидродинамического режима скв. Е-1 к вариациям напряженного состояния среды в зоне замедленного водообмена К-А ВТД в связи с подготовкой и реализацией групп сильных субдукционных землетрясений с магнитудами  $M_w \approx 7-8$  и локальными тектоно-магматическими процессами в области очага влк. Корякский. Отклики давления подземных вод на такие геодинамические процессы проявляются в форме трендов повышения и понижения уровня воды с повышенной скоростью в течение нескольких лет. Вместе с тем, такие региональные и локальные геодинамические процессы могут «накладываться» друг на друга и сопровождаться более сложными формами изменения уровня воды, что необходимо учитывать при выделении специфических фаз в геодинамическом состоянии недр К-А ВТД.

*Работа выполнена в рамках плановых тем НИР КФ ФИЦ ЕГС РАН  
№№ АААА-А16-116070550057-7, АААА-А16-116070550059-1  
при финансовой поддержке РФФИ,  
грант 18-05-00337 руководитель Г.Н. Копылова.*

### **Список литературы**

1. *Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А.* Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3-20.
2. *Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987-1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39-52.
3. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г.,  $M_w = 7.8$  // Тихоокеанская геология. 2012. № 5. С. 104-114.
4. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. и сильными ( $M \geq 5$ ) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41-54.

5. *Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г.* Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. № 4. Т. 52. С. 43-56.

6. *Селиверстов Н.И.* Активизация вулкана Корякский на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 7-9.

7. *Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998-2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.

8. *Фирстов П.П., Копылова Г.Н., Соломатин А.В., Серафимова Ю.К.* О прогнозировании сильного землетрясения в районе полуострова Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. Вып. 32. С. 106-114.

## Applications of Methods of MEQ's Mechanisms Estimates to Koryaksky Volcano Activity in 2008-2009

**Vladimir K. Lemzиков<sup>1</sup>, Mihail V. Lemzиков<sup>1</sup>, Evgenia V. Chernykh<sup>1</sup>, Alexey V. Kiryukhin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia*

<sup>2</sup> *Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003*

*lemzиков@kscnet.ru; jenia.chev@yandex.ru; AVKiryukhin2@mail.ru*

An analysis of local seismicity within the Koryaksky-Avachinsky Volcanic Cluster revealed a sequence of plane-oriented earthquake clusters that we interpret as a process of dike and sill emplacement. The highest magmatic activity occurred in timing with the 2008–2009 steam–gas eruption of Koryaksky Volcano, with magma injection moving afterwards into the cone of Avacha Volcano. In this paper, application of methods of MEQ's mechanisms estimates to Koryaksky volcano activity in 2008-2009 is given.

**Keywords:** magmatic plumbing system, plane-oriented clusters, a swarm of volcanic earthquakes, earthquake mechanism, local seismicity

## Изучение и сопоставление методов определения механизмов вулканических землетрясений в период активизации вулкана Корякский в 2008-2009 гг.

**Лемзиков В.К.<sup>1</sup>, Лемзиков М.В.<sup>1</sup>, Черных Е.В.<sup>1</sup>, Кирюхин А.В.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский 683006*

<sup>2</sup> *Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский 683003*

Анализ локальной сейсмичности в районе Корякско-Авачинской группы вулканов позволяет выявить последовательность плоско-ориентированных кластеров землетрясений, интерпретируемых как процесс внедрения даек и силлов. Наиболее активная магматическая деятельность наблюдалась во время извержения Корякского вулкана в 2008-2009 гг., после чего процесс внедрения магмы переместился в кратер Авачинского вулкана. В этой статье проведено сопоставление методов определения механизмов вулканических землетрясений в период активации вулкана Корякский в 2008 – 2009 гг.

**Ключевые слова:** магматическая питающая система, плоско-ориентированные кластеры, рой вулканических землетрясений, механизм очага землетрясений, локальная сейсмичность.

Вулкан Корякский (3456 м. абс.) – один из крупнейших действующих вулканов южной части полуострова Камчатка, входит в состав Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна площадью 2530 км<sup>2</sup> расположенного в 25 км от города Петропавловска-Камчатского.

Корякско-Авачинская группа вулканов является одним из эталонных объектов для мониторинга и анализа процессов, сопутствующих инжекции магмы из магматических очагов вулканов в периоды их активизации, наиболее значительная из которых произошла в 2008-2009 гг. [Гордеев и др. 2009; Селиверстов, 2009, Лемзиков, Лемзиков, 2015]. Регистрация сейсмической активности Корякско-Авачинской группы вулканов производится 7-ю радиотелеметрическими сейсмическими станциями по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, в юго-западной части бассейна осуществляются непрерывные наблюдения за гидрогеологическим режимом подземных вод на Пиначевских источниках и скв. Е-1 [Копылова, Болдина, 2012], на северном склоне Корякского вулкана с 2009 г. осуществляются наблюдения за температурным и газогидрохимическим режимом разгружающихся там термальных источников [Кирюхин и др. 2015, Kiryukhin et al 2017].

В работах А.В. Кирюхина и др. 2015, 2016, 2017 гг. предложен метод выявления и оценки геометрии магматических питающих систем вулканов (даек и силлов) по данным

локальной сейсмичности, который описывает результаты активизации Корякско-Авачинской группы вулканов 2008-2010 гг.

Обнаружение и оценка характеристик для плоскостно-ориентированных кластеров проводилось с использованием программы FracDigger (№ 2016616880), а П.О. PetraSim 5.0 используется для визуализации. FracDigger обнаруживает кластеры по следующим параметрам: (1) близость по времени – 1 сут.; (2) близость по расстоянию в горизонтальной плоскости – 6 км.; (3) близость к событию в плоскости 200 м.; (4) количеством землетрясений в кластере не менее 6-ти.

На примере вулкана Корякский впервые был опробован метод определения механизмов очагов с использованием поляризации первых вступлений  $P$ -волн, который может применяться при использовании слабых ( $M \approx 1$ ) вулканических землетрясений. В 2008-2009 гг. сетью радиотелеметрических сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН был зарегистрирован рой вулканических землетрясений вулкана Корякский как в период сейсмической подготовки, так и во время извержения. Выборка этих землетрясений, в диапазоне глубин очагов от 3.0 до 12.0 км, включает 27 событий (табл. 1) с разбросом значений их энергетических классов  $K_S$  от 5.2 до 7.2. [Лемзиков, Лемзиков 2015].

Для определения механизма очага использовался широко известный комплекс программ под названием FPFIT, FPLOT и др. [Reasenberga and Oppenheimer, 1985], разработанный во второй половине XX века по идеям работ [Введенская, 1956; 1969]. Алгоритмы, инструкции, описание и тексты этих программ доступны для специалистов на различных сайтах (например: <http://www.usgs.gov/>).

Полученные азимуты простираения плоскостей (strike) приведены на рисунке 1. В механизмах очагов слабых вулканических землетрясений вулкана Корякский наблюдаются только два азимута простираения плоскостей (strike). Определены медианные значения азимутов простираения плоскостей (strike), которые равны для зоны I (юго-западное)  $212^\circ \pm 17^\circ$  и для зоны II (северное или субмеридиональное направления)  $5^\circ \pm 12^\circ$ . (см. рисунок 1). Дополнительно еще отмечают особенности распределения в пространстве очагов слабых вулканических землетрясений вулкана Корякский (см. рисунок 2), которые разделяют его сейсмически активную область на две пространственно разделенные зоны. Общими признаками деления являются: 1) азимут простираения плоскостей (strike); 2) пространственное расположение глубин очагов. Эти зоны на рисунке 2 обозначены как I (южная) и II (северная). Деление в горизонтальной и вертикальной проекциях отмечены условными линиями I-I (см. рис. 2).

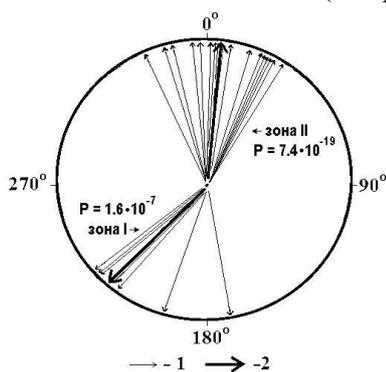


Рисунок 1 – Азимуты простираения (strike) плоскостей очагов слабых вулканических землетрясений вулкана Корякский. 1 – индивидуальные; 2 – медианные значения, которые равны для зоны I (юго-западное)  $212^\circ \pm 17^\circ$  и для зоны II (северное или субмеридиональное направление)  $5^\circ \pm 12^\circ$ .

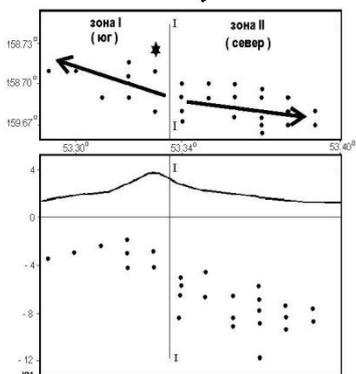


Рисунок 2 – Карта эпицентров вулканических землетрясений района вулкана Корякский. а – горизонтальная проекция, б – вертикальная проекция гипоцентров по направлению юг-север. 1 – вулканические землетрясения вулкана Корякский; 2 – положение вершины вулкана Корякский на горизонтальной проекции; 3 – средние значения азимутов простираения плоскостей очагов в двух зонах роя вулканических землетрясений вулкана Корякский в 2008-2009 гг. Средние значения азимутов простираения плоскостей равны для зоны I (юго-западное)  $212^\circ \pm 17^\circ$  и для зоны II (северное или субмеридиональное направление)  $5^\circ \pm 12^\circ$ .

В данной работе проведено сопоставление результатов – метода оценки механизма очагов слабых вулканических землетрясений в период подготовки и извержения вулкана Корякского путем поляризации первых вступлений сейсмических волн с плоско-ориентированными кластерами землетрясений, полученными по анализу распределения гипоцентров.

Для визуализации землетрясений выделенных методом волновых форм и ориентации в пространстве плоскостей использовалась следующая методика.

На первом этапе осуществлялось преобразование сейсмического события в плоскости в виде вектора радиусом 1000 м. с шагом в 100. В результате получили плоскость в виде диска с 37-ю точками и начальными координатами X; Y; Z.

Вторым этапом определим ориентацию диска в пространстве путем умножения координат X; Y; Z на матрицу преобразования.

$$\begin{pmatrix} X2 \\ Y2 \\ Z2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cdot \cos \alpha & -\cos \beta \cdot \sin \alpha & -\sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ \sin \beta \cdot \cos \alpha & -\sin \beta \cdot \sin \alpha & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – азимут простираания (Strike0),  $\beta$  – угол падения (Dip0).

На третьем этапе вычисляем сдвиг полученного диска на значения X0; Y0; Z0 (см. таблица 1.).

Анализ механизмов очагов вулканических землетрясений 2008-2009 гг. по полярности вступлений Р-волн указывает на плоско-ориентированный характер разломов, ассоциирующихся с землетрясениями, их субмеридиональную ориентацию и позиционирование на разных глубинах (1.8-4.2 км) к югу от вершины Корякского вулкана и (4.2-12.7 км) к северу от нее, что хорошо согласуется с полученными нами характеристиками плоско-ориентированных кластеров землетрясений.

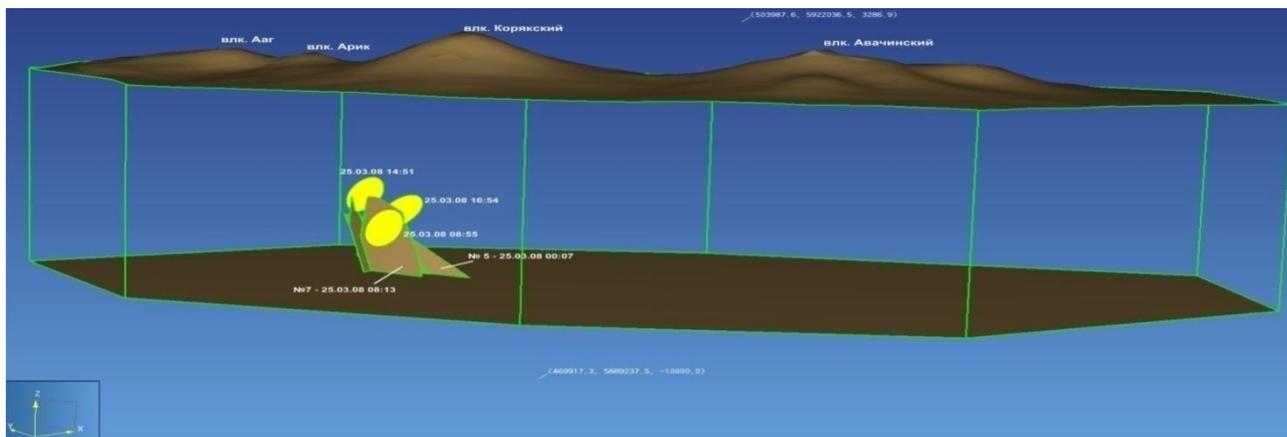


Рисунок 3 – Концептуальная модель образования даек и очагов землетрясений Корякско-Авачинской группы вулканов за 25.03.2008 г.

На рис. 3 выделены цветом плоскости очагов землетрясений определенные по полярности Р-волн от 25.03.2008 08:55, 25.03.08 14:51 и 25.03.2008 16:54, а также показаны плоскости интерпретируемых плоско-ориентированных кластеров землетрясений №5 от 25.03.2008 00:07 и №7 25.03.2008 08:13. Все эти плоскости находятся в диапазоне глубин от 5600 до 1000 м. абс. и ассоциируются с наиболее вероятной плоскостью разлома субмеридиональной зоны с углом падения плоскостей в диапазоне от 590 до 740.

**Таблица 1.** Сопоставление параметров механизма очагов для землетрясений вулкана Корякский с плоско-ориентированными кластерами землетрясений 2008–2009 гг.

Дата (год, месяц, день, час, мин., сек)	Координаты очага землетрясения			K <sub>s</sub>	Параметры механизма очага			№ кластера
	X <sub>0</sub> , м	Y <sub>0</sub> , м	Z <sub>0</sub> , м		Strike <sup>o</sup>	Dip <sup>o</sup>	Rake <sup>o</sup>	
24.03.2008 22:33	482044	5915690	-8600	6.7	4	58	-166	2,3,4,
24.03.2008 22:45	481370	5913468	-11700	6.1	3	64	-167	2,3,4,
25.03.2008 01:07	480709	5914583	-7600	6.8	16	57	-134	5,6,7,9,10
25.03.2008 01:26	481379	5915693	-7500	6.5	15	55	-135	5,6,7,9,10
25.03.2008 04:18	481375	5914580	-8500	6.3	11	67	-141	5,6,7,9,10
25.03.2008 08:55	481370	5913468	-7700	5.9	6	74	-122	5,6,7,9,10
25.03.2008 14:51	482044	5915690	-6100	6.4	17	69	-138	5,6,7,9,10
25.03.2008 16:54	482036	5913465	-6800	6.0	351	59	-140	5,6,7,9,10
26.03.2008 07:32	482044	5915690	-7600	5.7	358	63	-12	10
03.07.2008 12:11	478674	5905692	-3300	5.2	214	52	-168	16,17,18
03.10.2008 15:16	479355	5909026	-3000	5.2	221	55	-179	22,23
23.10.2008 07:54	481366	5912355	-9000	5.4	356	79	126	Нет кластеров
28.10.2008 10:04	478018	5907920	-3100	5.2	3	64	-114	29,30
05.11.2008 15:07	480691	5910133	-5100	6.1	211	45	154	Нет кластеров
05.11.2008 19:14	481357	5910130	-4900	5.2	193	57	-153	Нет кластеров
28.11.2008 01:48	480691	5910133	-8100	6.7	14	81	-138	32
28.11.2008 13:52	480025	5910136	-5400	6.3	1	62	-103	32
03.03.2009 17:57	480025	5910136	-5700	5.9	15	68	-157	44,45
06.03.2009 01:08	480035	5912361	-8300	7.1	18	71	-144	48,49,50,51
06.03.2009 01:21	480030	5911248	-4500	5.3	348	61	-126	48,49,50,51
08.03.2009 13:11	479350	5907914	-5300	5.6	342	53	131	Нет кластеров
13.03.2009 03:19	480682	5907908	-4200	5.6	351	68	-131	52
10.04.2009 16:58	481370	5913468	-5600	6.0	21	63	-121	68
14.04.2009 03:15	480678	5906796	-2700	5.6	223	76	105	70,71
19.04.2009 04:40	480678	5906796	-2300	5.7	220	68	95	74,75
24.04.2009 02:42	480673	5905683	-2600	5.9	216	63	156	79,80
28.04.2009 04:09	481353	5909018	-4200	5.7	173	69	119	82,83

Примечание (Strike) – азимут простирания; (Dip) – угол падения; (Rake) – угол подвижки относительно простирания.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 18-05-00052.*

### Список литературы

1. Введенская А.В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1956. № 3. С. 34–47.
2. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 130 с.
3. Гордеев Е.И., Дроздин В.А., Дубровская И.К., Муравьев Я.Д., Овсянников А.А. Корякский вулкан: современное состояние и активация 2008-2009 гг. Вулканизм и геодинамика: Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т.2. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С.588-590.

4. *Селиверстов Н.И.* Активизация вулкана Корякский на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. №1. Вып. 13. С. 7-9.
5. *Лемзиков В.К., Лемзиков М.В.*, Изучение механизмов очагов слабых вулканических землетрясений в период подготовки и извержения вулкана Корякский (2008-2009 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2015. №6. С. 34-43.
6. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Камчатка, с активацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. и сильным ( $M \geq 5$ ) землетрясениями 2012 г. // Вулканология и сейсмология. 2012. №5. С.41-54.
7. *Кiryukhin А.В., Федотов С.А., Кiryukhin П.А.*, Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3-20.
8. *Кiryukhin А.В., Федотов С.А., Кiryukhin П.А., Черных Е.В.* Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. №5, С. 3-17.
9. *Kiryukhin A.* Analysis of Magma Injection Beneath an Active Volcano Using a Hydromechanical Numerical Model (CFRAC) // EAGE conference "Horizontal wells", Kazan (2017) 4 p. DOI: 10.3997/2214-4609.201700475.
10. *Reasenberг P., Oppenheimer D.* FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1985. № 85-739. 109 p.
11. *A. Kiryukhin, V. Lavrushin, P. Kiryukhin, P. Voronin* "Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia)," Geofluids, vol. 2017, Article ID 4279652, 21 p., 2017. doi:10.1155/2017/4279652.

## SECTION III. MAGMATIC FRACTURING AS AN ANALOGUE OF THE DEVELOPMENT OF HYDROCARBON RESERVOIRS WITH HARD-TO-RECOVER RESERVES

### РАЗДЕЛ III. МАГМАТИЧЕСКИЙ ФРАКТИНГ КАК АНАЛОГ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ

УДК 622:550.36

#### Simulating fluid injection in 3D poro-visco-elasto-plastic rocks

**Beatriz Martínez Montesinos, Boris Kaus**

*Geosciences, Johannes Gutenberg University, Mainz, Germany*

*bmartine@uni-mainz.de, kaus@uni-mainz.de*

Injection of water into wells at high pressures, in order to create fractures and increase permeability of rocks, is a technique often used to stimulate geothermal systems. Understanding, through numerical modelling, how such actions could influence the local state of stress of the reservoir and how fractures propagate through it may help to efficiently develop the extraction projects and, hopefully, to avoid undesired side effects. We increased the capabilities of the software LaMEM by adding plasticity, poro-elasticity and Darcy flow, in order to make it able to simulate hydrofracturing in poro-visco-elasto-plastic rocks. This improvement offers us an efficient computational massively-parallel 3D code to model fluid injection and crack propagation, and allows us to investigate failure patterns created by shear/tensile stresses in heterogeneous media, due to increased localized pore pressure.

**Keywords:** 3D numerical modeling, fluid injection, crack propagation, geothermal energy

#### Симуляция инъекции жидкости в горные породы в трёхмерной поро-вязко-упруго-пластичной постановке

**Беатрис Мартинес Монтесинос, Борис Ж. П. Каус и Антон А. Попов**

*Отделение геофизики, Университет Майнца имени Иоганна Гутенберга*

*Иоганн-Иоахим-Бехер-Вег 21, 55128 Майнц, Германия*

Инъекция жидкости в горные породы под большим давлением, с целью создания системы трещин и увеличения их проницаемости, является часто используемой техникой применяемой для стимуляции геотермальных систем. Понимание, с использованием численного моделирования, того как инъекция влияет на локальное напряженно-деформированное состояние и распространение трещин в резервуаре может способствовать эффективной разработке геотермальных проектов, и по возможности избежанию нежелательных побочных эффектов. В данной работе мы расширили возможности программного пакета LaMEM внедрением поддержки пластического течения и фильтрации жидкости в пористой среде (закон Дарси), с целью его применения для симуляции гидроразрыва в горных породах в связанной поро-вязко-упруго-пластичной постановке. Данные программные улучшения предоставляют нам эффективный массивно-параллельный трёхмерный пакет для симуляции инъекции жидкости и распространения трещин, и позволяют исследовать структуры разрушения гетерогенной среды, обусловленные сдвиговыми и растягивающими напряжениями, вызванными локализованным приростом порового давления.

**Ключевые слова:** трёхмерное численное моделирование, инъекция жидкости, гидроразрыв, распространение трещины, геотермальная энергия

#### Introduction

In order to simulate geological processes such as lithospheric deformation it was developed LaMEM (Lithospheric and Mantle Evolution Model), a scalable 3D parallel code that employs a staggered finite difference discretization combined with a marker and cell approach. This software solves, in an efficient way, the (incompressible) Stokes equations in rheologies involving rocks that have nonlinear visco-elasto-plastic material properties. In particular, this code is able to model the

formation of localized shear bands during planar deformation in agreement with theoretical and experimental results ([1]).

However, it is well known that liquid pressure in porous rocks plays an important role in processes such as enhanced geothermal systems as it influences the state of stress of the reservoir (e.g. [2], [3]) and, thus, must be considered when modelling deformation and failure. Here, we take advantage of LaMEM and follow previous ideas ([4], [5]) to implement Darcy flow and couple it with the Stokes equations in order to account for liquid pressure in porous rocks. In addition, as such processes develop at relatively low temperatures, when the mechanical behavior is almost elasto-plastic, we improved plasticity by adding the dilation angle of rocks and by implementing tensile failure, one of the possible failure modes due to local pore-fluid overpressuring and/or extensional forces. Furthermore, as it has been proven that effective stress influences the hydraulic properties of the materials (e.g. [6], [5]), we made the code able to account for changes in permeability when tensile or shear failure is reached.

### Method

We consider a continuous media under the effect of gravity ( $g$ ) composed by poro-visco-elasto-plastic rocks with properties density ( $\rho$ ), shear modulus ( $G$ ), bulk modulus ( $K$ ) and viscosity ( $\mu$ ). To describe the main factors acting in the medium we use Cauchy stresses ( $\sigma_{ij}$ ), pressure ( $P$ ), deviatoric stresses ( $\tau_{ij}$ ) and temperature ( $T$ ) and, to describe deformation, velocities ( $v_i$ ), strain rates ( $\dot{\epsilon}_{ij}$ ) and its poro-elastic, viscous and plastic decomposition

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{pe} + \dot{\epsilon}_{ij}^v + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

Here,  $i$  and  $j$  refers to coordinate indexes ( $x, y, z$ ). We assume that pores are connected and filled, in a measure given by the permeability ( $k$ ) and the specific storage ( $S_s$ ) properties, by a liquid of density  $\rho_l$  exerting pressure ( $P_l$ ) on rocks. We define, then, the effective pressure of the system as

$$P_{eff} = P - P_l \quad (2)$$

In addition, we assume the existence of a limit for rock stresses, the scope of which produces plastic failure and is defined by cohesion ( $C$ ), friction angle ( $\phi$ ) and tensile strength ( $\sigma_T$ ). The combined yield criteria for shear ([6]) and tensile failure ([7]) that we use is given by (figure 1)

$$\tau_{yield} = \min(P_{eff} \sin \phi + C \cos \phi, P_{eff} + \sigma_T) \quad (3)$$

and the plastic behavior is defined by the plastic flow potential ([8], [9])

$$Q = \tau_{II} - P_{eff} \sin \psi \quad (4)$$

Being  $\psi$  the dilation angle indicating the relation between the plastic volumetric strain rate and the rate of plastic distortion ([8])

$$\sin \psi = \frac{\dot{\epsilon}_{xx}^p + \dot{\epsilon}_{yy}^p + \dot{\epsilon}_{zz}^p}{2\dot{\epsilon}_{II}^p} \quad (5)$$

and considering  $\psi=90^\circ$  for tensile failure. The expressions  $\tau_{II}$  and  $\dot{\epsilon}_{II}^p$  denote the second invariant of the deviatoric stress and the plastic strain rate, respectively. If yield is reached, the plastic strain rates are given by

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \chi \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} = \dot{\epsilon}_{II}^p \left( \frac{\tau_{ij}}{\tau_{II}} + \frac{2}{3} \sin(\psi) \delta_{ij} \right) \quad (6)$$

being  $\chi$  multipliers satisfying the yield condition

$$\tau_{II} = \tau_{yield}. \quad (7)$$

We solve the mass, momentum and energy conservation equations for the solid skeleton affected by the liquid pressure,

$$\alpha_T \frac{DT}{Dt} - \frac{1}{K} \frac{DP}{Dt} + 2 \sin(\psi) \varepsilon_{II}^p = \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial (P + \alpha P_l)}{\partial x_i} + \rho g_i = 0 \quad (9)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + H \quad (10)$$

and the mass conservation equation combined with the Darcy's law for liquid

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial P_l}{\partial x_j} - \rho_l g_e \right) \right) + H_l = S_s \frac{DP_l}{Dt} \quad (11)$$

considering the poro-visco-elasto-plastic constitutive relation to describe deviatoric changes

$$\dot{\varepsilon}'_{ij} = \frac{1}{2G} \frac{\widehat{D}\tau_{ij}}{Dt} + \varepsilon_{II}^{vs} \frac{\tau_{ij}}{\tau_{II}} + \varepsilon_{II}^p \frac{\tau_{ij}}{\tau_{II}}. \quad (12)$$

Here,  $x_i$  ( $i = 1,2,3$ ) are the spatial coordinates,  $D/Dt$  is the material time derivative,  $\widehat{D}/Dt$  the Jaumann derivative,  $\alpha_T$  the thermal expansion coefficient,  $\alpha$  the Biot-Willis constant and  $H$  and  $H_l$  are possible head or liquid sources, respectively. Equations (8) to (11) have been discretized in space by using staggered grid finite differences method. To achieve scalability on massively parallel machines have been used the distributed arrays (DMDA) and iterative solvers (KSP, SNES) from the PETSc library ([10]). A Marker and Cell method has been employed to track material properties which are advected in an Eulerian kinematical framework.

### Example

We show here an example of simulation of fluid injection and crack propagation in a heterogeneous 3D setup (figure 1). The model considered is 9 km long, 4 km wide and 3 km high and is composed by five layers and sectioned by a normal fault (table 1). We impose free surface at the top and free slip at the bottom and lateral boundaries, and, to simulate an extensional regime, we apply a constant background strain rate of 10-15 s<sup>-1</sup> in the x direction. To simulate an injection/production system of water heating we consider a positive fluid source in the point indicated by blue arrow and a negative source in the point indicated by red arrow in figure 2. To simulate hydrofracturing we apply in the three points marked by yellow arrows bigger source magnitudes to increase stress and produce fractures. Figure 2 shows the result of the simulation after 10000 seconds of simulation.

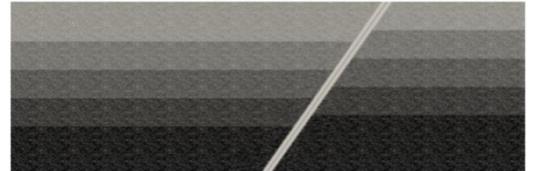


Figure 1 – Section of the model setup used for the simulation.

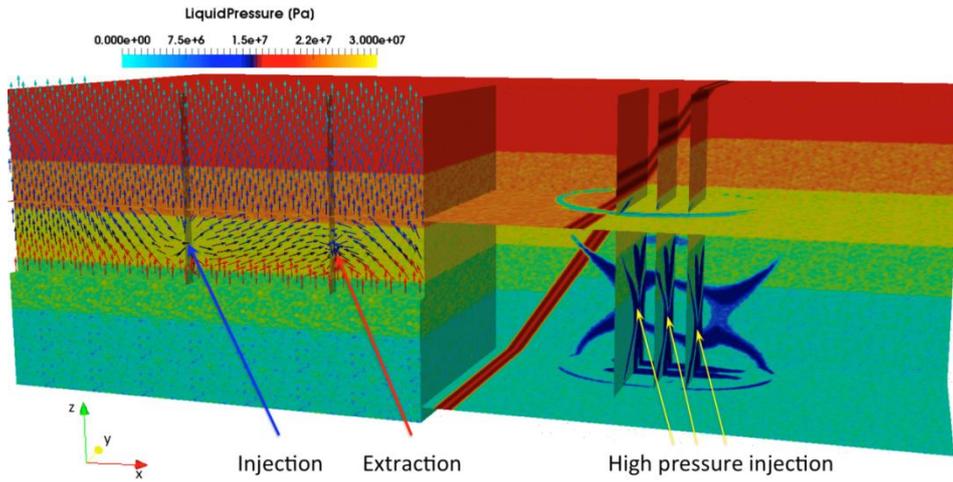


Figure 2 – Simulation of fluid injection and crack propagation. Different colours in the model setup indicate different material properties. On the left side, vectors direction and colour show the fluid velocity and fluid pressure, respectively. We can observe the influence of the low-pressure fluid injection/extraction on the direction of flow which is expected to be pointing upwards due to the extensional regime. On the right side, blue colour indicates where yield stress is reached either by tensile or shear mode.

**Table 1.** Material parameters employed for the simulation. Multiples value of density and permeability belong to layers from bottom to top, inner and external part of the fault, properties after failure and, the last one, corresponds to a random material that was mixed throughout the model. Source magnitudes correspond to those used for low-pressure injection, low-pressure extraction and high-pressure injection.

Variable	Parameters	Value	Units
$\rho$	Density	[2700,2600,2500,2500,2600,2700,2700,2700,2700]	Kg m <sup>-3</sup>
$\rho_l$	Liquid density	1000	Kg m <sup>-3</sup>
$G$	Shear module	5x10 <sup>4</sup>	MPa
$\nu$	Poisson's ratio	0.27	
$C$	Cohesion	40	MPa
$\phi$	Friction angle	45	(°)
$\psi$	Dilation angle	45	(°)
$\sigma_T$	Tensile strength	20	MPa
$k$	Permeability	[10 <sup>-16</sup> ,10 <sup>-40</sup> ,10 <sup>-5</sup> ,10 <sup>-11</sup> ,10 <sup>-8</sup> ,10 <sup>-30</sup> ,10 <sup>-14</sup> ,10 <sup>-15</sup> ,10 <sup>-20</sup> ]	m <sup>2</sup>
$S_s$	Specific storage	10 <sup>-4</sup>	MPa <sup>-1</sup>
$H_m$	Source magnitude	[5x10 <sup>-4</sup> ,5x10 <sup>-4</sup> ,10,10,10]	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>

*This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 642029 - ITN CREEP.*

## References

1. Kaus B J P, Popov A A, Baumann T S, Püsök A E, Bauville A, Fernandez N and Collignon M 2016 Forward and inverse modelling of lithospheric deformation on geological timescales NIC Symposium 2016-Proceedings, NIC Series **48** 299-307.
2. Häring M O, Schanz U, Ladner F and Dyer B C 2008 Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system Geothermics **37**(5), 469-495

3. Shapiro S A and Dinske C 2008 *Fluid-induced seismicity: Pressure diffusion and hydraulic fracturing* Geophysical Prospecting **57**(2),301-310
4. Rozhko A Y, Podladchikov, Y Y and Renard F 2007 *Failure patterns caused by localized rise in pore-fluid overpressure and effective strength of rocks* Geophysical Research Letters **34**(22)
5. Galvan B and Miller S 2013 *A full GPU simulation of evolving fracture networks in a heterogeneous poro-elasto-plastic medium with effective-stress-dependent permeability* GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering (pp. 305-319) Springer, Berlin, Heidelberg
6. David C, Wong T, Zhu W and Zhang J 1994 *Laboratory measurement of compaction-induced permeability change in porous rocks: Implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust* Pure and Applied Geophysics **143** (1-3),425-456 Springer
7. Paterson M S and Wong T F 2005 *Experimental rock deformation-the brittle field* Springer Science & Business Media
8. Murrell S A F 1964 *The theory of the propagation of elliptical Griffith cracks under various conditions of plane strain or plane stress: Parts II and III* British Journal of Applied Physics, **15**(10) 1211
9. Vermeer P A and De Borst R 1984 *Non-associated plasticity for soils, concrete and rock* HERON, **29**(3)
10. Moresi L, Quenette S, Lemiale V, Meriaux C, Appelbe B and Mühlhaus H B 2007 *Computational approaches to studying non-linear dynamics of the crust and mantle* Physics of the Earth and Planetary Interiors **163**(1-4) 69-82
11. Balay Set al 2015 *PETSc users manual, Technical Report ANL-95/11-Revision 3.6* Argonne National Laboratory

## **Role into the impact fluid fracturing in the formation of deposits in the Bazhenov formation: natural mechanisms and processes, prospects of modern**

**Tatiyana A. Korovina<sup>1</sup>, E.P. Kropotova<sup>2</sup>, E.A. Romanov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*CORETESTSERVIS Ltd.,*

<sup>2</sup>*SurgutNIPIneft, Tyumen, Russia*

*korovina\_ta@coretest.ru; dragonkitten@rambler.ru; [romanov@coretest.ru](mailto:romanov@coretest.ru)*

Rocks of the Bazhenov formation in Western Siberia are represented by clay-siliceous-carbonate kerogen-saturated (from 3 to 25% (rarely more) sorghum.) complex rocks. Deposits of Bazhenov formation are not terrigenous-the content of terrigenous material does not exceed 10% (average 3-7%). The formation is an organic, chemical tecton-dependent system, which is in a continuous process of development. The formation of a predominantly was fractured type of reservoir is determined by a set of different-scale mechanisms of fluid fracturing. Microfractures occurs as result of fracturing in the process of hydrocarbon generation by kerogen. The generation processes are interrupted at the initial stages, the oil content does not reach the field conditions, if there is no primary fractured reservoir. Subsequent tectonic activations and the spatial structure of tectonic stresses control the localization of the reservoir and the rate of generation of hydrocarbons by the kerogen. The formation of tectonic macro-fractures in the determining role of fluid dynamic processes is accompanied by the introduction of hydrothermal solutions. The combination of micro and macro fracturing is a natural mechanism of formation of oil reservoir in the Bazhenov formation. The use of frac technologies in the conditions described above cannot lead to a fundamental change in the kinetics of oil generation. Provided by only the increased speed of extraction of oil at a significantly reduced end-KIN, which demonstrates the practice of technology implementation in Western Siberia. As a result, of hydraulic fracturing there is a simple redistribution of the generated oil between technology and natural fractured reservoirs. The question of expediency of application of technology for development of productive deposits in Bazhenov formation, according to the authors, is debatable.

**Keywords:** fracturing, Bazhenov formation, hydrocarbon generation, fluid dynamics, hydrothermal fracturing, tectonic stresses

## **Роль флюидоразрыва в формировании залежей в баженовской свите: природные механизмы и процессы, перспективы современных технологий**

**Коровина Т.А.<sup>1</sup>, Кротова Е.П.<sup>2</sup>, Романов Е.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*ООО «Корэст Сервис»,* <sup>2</sup>*Тюменское отделение «СургутНИПИнефть»*

Породы битуминозной формации баженовской свиты в Западной Сибири представлены глинисто-кремнисто-карбонатным керогеносыщенным (от 3 до 25% (редко более) Сорг.) комплексом пород. Отложения баженовской свиты не являются терригенными – содержание терригенного материала не превышает 10% (среднее 3-7%). Формация представляет собой органогенную, хемогенную тектонозависимую систему, находящуюся в непрерывном процессе развития. Формирование преимущественно трещинного типа резервуара определяются совокупностью разномасштабных механизмов флюидоразрывов (фракинга). Микротрещиноватость возникает в результате автофлюидоразрыва в процессе генерации углеводородов керогеном. Первичный трещинный коллектор, без которого процессы генерации прерываются на начальной стадии, а нефтеносность не достигает промышленных кондиций, обусловлен дизъюнктивными процессами и реализуется в зонах разломов. Последующие тектонические активизации и пространственная структура тектонических напряжений контролируют локализацию резервуара и скорость генерации углеводородов керогеном. Формирование тектонической макротрещиноватости при определяющей роли флюидодинамических процессов сопровождается внедрением гидротермальных растворов. Сочетание микро- и макрофракинга – природный механизм образования нефтяных залежей в баженовской свите. Применение технологий гидроразрыва пласта (ГРП) в описанных выше условиях не может привести к кардинальному изменению кинетики генерации нефти. Обеспечивается лишь возрастание скорости отборов нефти при существенном снижении конечного КИН, что демонстрирует практика внедрения технологии в Западной Сибири. В результате

ГРП происходит простое перераспределение генерированной нефти между техногенным и природным трещинными коллекторами. Вопрос целесообразности применения технологии для разработки продуктивных отложений в баженовской свите, по мнению авторов, является дискуссионным.

**Ключевые слова:** гидроразрыв пласта, Баженовская свита, генерация углеводородов. флюидодинамика, гидротермальный фразинг, тектонические напряжения

История обнаружения продуктивности баженовской свиты<sup>1</sup> (далее – БС) очень давняя – в 60-е годы прошлого столетия на Салымской геологоразведочной площади при разведочном бурении на среднеюрские объекты впервые была вскрыта нефтяная залежь в глинах верхней юры [1]. Ошеломляющее во всех отношениях событие вызвало огромный интерес ученых и геологов - процесс изучения формации продолжается поныне. Большой вклад в познание природы нефтегазоносности свиты внесли сложившиеся за прошедшие годы на этой тематике школы С.Г. Неручева, А.Э. Конторовича, И.И. Нестоерова, О.К. Баженовой и других. Особую роль в качестве нефтематеринской свиты этот объект после своего открытия сыграл в теоретических построениях Н.Б. Вассоевича, основоположника флюидно-миграционной концепции нефтегазоносности.

Породы, слагающие БС, представлены глинистыми, кремнистыми, карбонатными разностями в различном их сочетании, содержащими от 3 до 25% (редко более) Сорг. в виде керогена. Осадок, на 90% и более представленный бентосом<sup>2</sup>, накапливался на дне обширного баженовского бассейна. Минеральная составляющая пород формируется по захороненному бентосу с участием растворенных минеральных компонентов придонных вод [2].

В последние годы в ряде скважин обнаружены признаки, указывающие на возможный вклад газогидратов в органическую углеродонасыщенность БС. Региональное (в пределах всей Западной Сибири) распространение формации, на взгляд авторов, связано с растяжением в поздне-юрское время слабо консолидированной Западно-Сибирской плиты. Оно привело вне зависимости от глубины бассейна и климатических факторов к повсеместному распространению сероводородного заражения придонных вод за счет их сульфатизации гидротермальными источниками и последующей сульфатредукции. Следует отметить, что в процессе накопления осадков в керне наблюдается выпадение пирокластического вулканического материала (тонкодисперсные пеплы). Хомогенный характер трансформации захороненного материала на всех этапах осадконакопления и литификации обуславливает особый облик баженовских пород, не позволяющий отнести их к аналогам терригенных северо-американских сланцев [см. 2]. Помимо распространения нефтегазоносности внутри самой формации, она играет существеннейшую роль в качестве региональной покрывки, флюидоупорные свойства которой существенно усиливаются присутствием керогена. Благодаря уникальной пластичности по отношению к подстилающим и перекрывающим отложениям в 30 метровой тоще БС «гасится» до 80% глубинных разломов, секущих подбаженовские отложения и фундамент. Фактор тектонозависимости играет существенную роль в распределении зон активизации генерации углеводородов керогеном. Отмечено, что зачастую залежи формируются в зонах пониженных тепловых потоков (расчетные температуры - 90-95°C) в сравнении с непродуктивными зонами в которых тепловой поток формально значительно выше (расчетные температуры - 120-130°C)

Нефтеносность БС обуславливается двумя факторами (insitu): формированием трещинного коллектора и генерацией углеводородов керогеном облегающих зону коллектора пород. Оба зависят от тектонической активизации на конкретном участке: время

<sup>1</sup> Баженовская свита представляет собой органогенную (по составу), хомогенную (по механизмам литификации) и тектонозависимую формацию поздне-юрского возраста, распространенную по всей территории Западной-Сибири. Глубина залегания в пределах разрабатываемых в Широком Приобье месторождений составляет от 2,7 до 3 км.

<sup>2</sup> Отложения баженовской свиты не являются терригенными – содержание терригенного материала не превышает 10% (среднее 3-7%)[2]

(достижение керогеном определенной стадии зрелости), интенсивность (общая энергия) и продолжительность (устойчивая пространственная модель напряженного состояния).

В процессе многолетнего изучения керна (более 400 скважин) с участием авторов установлено, что индикатором всей совокупности процессов формирования залежей является кероген. Исследование показало, что степень его трансформации (генерация УВ) зависит не от исходного ОВ, не от температуры и её градиента, но преимущественно от пространственного положения скважины, вскрывшей разрез [3] (рис.1), что определяется структурой напряженных состояний, обусловленных тектоникой [4].

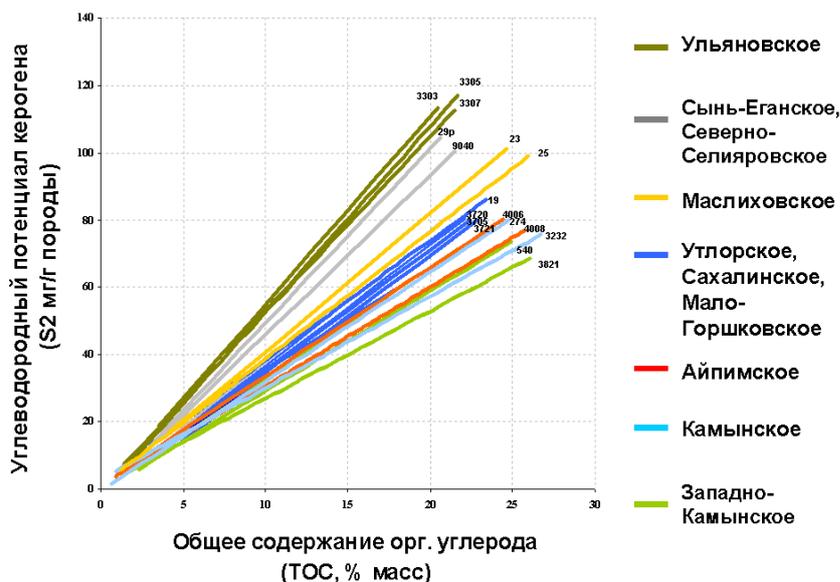


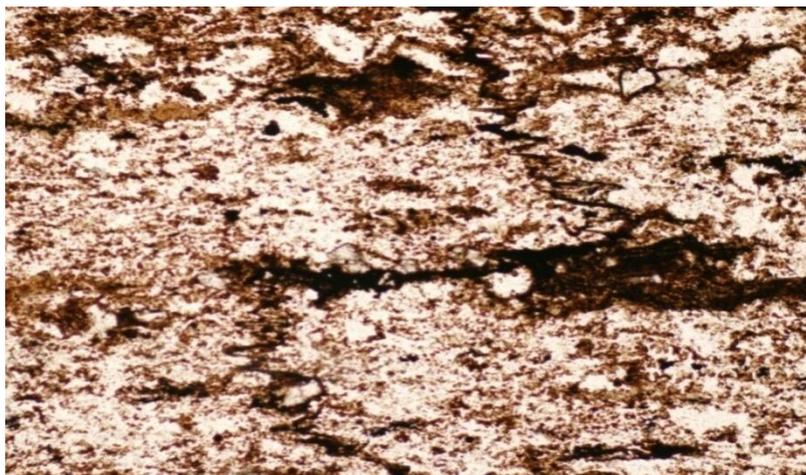
Рисунок 1 – Анализ геохимических параметров керогена

Более того, в пределах одного месторождения от скважины к скважине отношение параметров керогена (общее содержание ОВ и водородный индекс, коэффициент корреляции 0,7-0,98) закономерно изменяются в одном направлении. Для другого месторождения оно может быть иным и т.д. Отсюда возникла механохимическая (геомеханическая) модель формирования залежей в БС [см.3].

А что же флюидоразрывы?

Без приведенного выше экскурса в особенности уникальной во всех отношениях формации невозможно понять всю взаимосвязанность флюидодинамических процессов, приводящих к формированию залежей и управляющих её функционированием в разбуренной сетке скважин с различными технологиями вскрытия и освоения, которые сопровождаются природным и техногенным (при ГРП) фразингом.

При достижении катагенетической стадии трансформации керогена, близкой «нефтяному окну», начинается генерация углеводородов (микронефть). Плотность нефти в сравнении с керогеном существенно ниже, поэтому накопление её в ослабленных зонах приводит к увеличению их объема по мере роста порового давления выше литостатического. На фотографии прозрачного шлифа (рис.2) микротрещина тангенциально сечет керогенонасыщенные и минеральные слои породы. Процесс генерационного флюидоразрыва развивается только в том случае, если его сопровождает миграция образующейся нефти в трещинный коллектор, образованный в результате тектонического растрескивания преимущественно карбонатизированных литотипов. Он сопровождается постепенным нарастанием аномально высокого пластового давления не только в зоне генерации, но и в заполняемом трещинно-поровом коллекторе, основу которого составляет тектоническая трещиноватость. Коэффициент аномальности пластового давления (АВПД) достигает 2 (редко более) в наиболее продуктивных промышленных залежах.



*Рисунок 2 – Трещина напряжения, заполненная углеводородным веществом*

До настоящего времени отсутствуют обоснованные критерии их выделения по разрезу, а также оконтуривания по площади. Учитывая вышесказанное, представляется, что в процессе формирования и даже в процессе разработки промышленных залежей они могут меняться. В отсутствие аккумулирующего коллектора процесс генерации выходит в равновесную стадию, аномальность порового давления реализуется в диффундировании образующейся микроневти в выше и ниже (?) лежащие терригенные отложения. Его подтверждает формирование слоисто-битуминизированной пачки  $S_0$  в подошве подачимовских глин перекрывающих баженовскую свиту.

Другой механизм флюидоразрыва (гидротермальный) очевидно задействован в формировании трещинного коллектора. Следует отметить, что, если генерационный тип флюидоразрыва характеризуется накопительной динамикой, постепенно нарастающей кинетикой, то гидротермальный можно отнести по динамике к процессам взрывным (катастрофическим). Как правило, они развиваются в упруго деформируемых литологических разностях карбонатизированных радиоляритов, собственное керогеносодержание которых значительно ниже глинистых слоистых. И, если в целом БС характеризуется значительной пластичностью, то внутри неё карбонатизированные литотипы в сравнении с глинистыми существенно менее пластичны, отличаются большим коэффициентом хрупкости и снижением прочности, что и приводит к трещинообразованию вблизи тектонических разломов. На рисунке 3 представлена тектоническая трещина секущая битуминозную породу и заполненная кальцитом. Сохранение обломков матрицы породы в массе кальцита, однородность карбонатного материала и отсутствие разрыва на контакте пород свидетельствует о высокой динамике процесса с участием углекислотной гидротермальной системы.

Промышленный потенциал залежи в битуминозной толще зависит от сочетания динамик генерационного процесса (продуцирование углеводородов), скорости миграции генерированной нефти в первичный трещинный коллектор, пространственной структуры и параметров тектонических напряжений, приводящих как к образованию трещинного коллектора, так и энергетически регулирующих первые два процесса. И это, по мнению авторов, является основным аспектом природы нефтеносности БС. С этих позиций трудно представить возможность техногенного влияния на любую из составляющих описанной модели.



Рисунок 3 – Тектоническая трещина, заполненная мелкокристаллическим кальцитом

В заключении описания механизмов природных флюидодинамических процессов необходимо указать на полное совпадение палеотемпературной зональности, изученной по керну баженовской свиты и фундамента в скважинах, одновременно вскрывших БС и фундамент, при отсутствии корреляций обоих объектов с промежуточными отложениями нижней и средней юры, что подчеркивает контролируемую функцию тектоники.

Два слова о технологическом гидроразрыве (ГРП).

Современные представления о термодинамике природных систем [5] свидетельствуют о преобладающей роли глобальных тектонических процессов в их развитии. Это обстоятельство нельзя недооценивать при выборе современных технологий освоения скважин при разработке промышленных залежей. Опыт применения ГРП в баженовской свите показывает, что при достижении после ГРП кратковременного эффекта в одной скважине средний дебит по залежи практически не меняется. Учитывая значительную себестоимость технологии и негативные экологические влияния агрессивных сред гелей ГРП, следует вернуться к оценке целесообразности применения этой технологии в БС только на основании того, что она эффективна в совершенно иных геологических системах.

#### **Список литературы**

1. *Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Тянь А.А.* Сургутский свод. М: Недра, 1968.
2. *Коровина Т.А., Кропотова Е.П., Гультияев С.В., Крицкий И.Л., Шадрин С.В.* Генетические аспекты формирования баженовской свиты и критерии прогноза её промышленной продуктивности.// Материалы Нефтяного конгресса. М: 2014 год.
3. *Коровина Т.А.* Закономерности формирования и распространения коллекторов в битуминозных отложениях баженовской свиты для оценки перспектив нефтегазоносности западного склона Сургутского свода. Автореферат диссертации на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук. Санкт-Петербург, ВНИГРИ, 2004, – 27с.
4. *Ибраев В.И.* Прогнозирование напряженного состояния коллекторов и флюидоупоров нефтегазовых месторождений Западной Сибири. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2006, – 208 с.
5. *Simonenko Sergey V.* Fundamentals of the Thermohydrogravidynamic Theory of Cosmic Genesis of the Planetary Cataclysms: Monograph. - Nakhodka: Institute of Technology and Business, 2010. – 281 p.

## Identification of paleovolcanic rocks on seismic data

**Sabine Klarner, Olaf Klarner**

*Klarencо LLC, Germany*

*ok@klarenco.com; sk@klarenco.com*

While exploring for hydrocarbons in rift related or active margin basins, volcanics, volcanoclastics or their erosional products are common lithologies. The presence of rock types derived from volcanism and/or affected by post-volcanic re-deposition may lead to lithologies with complex diagenetic overprints at the reservoir level. Partial or complete reservoir substitution, alteration by circulating hot fluids and addition of mineral components have led to a number of unsuccessful wells, both in exploration and field development projects. It is therefore essential to understand the distribution of volcanics in the vicinity of the reservoir.

Having worked in different basins around the world, we have identified distinct features which help us to detect volcanics and volcanic related lithologies from seismic data. Those features can be subdivided in two main groups: (1) amplitude expressions, particularly the AVO behavior and (2) geometries, specifically in comparison with observed morphology of recent volcanics. Modern seismic interpretation technologies, such as 3D imaging and visualization, spectral decomposition, analysis of elastic rock properties and AVO analysis in combination with sound geological understanding of recent volcanism reveal completely new insights into the geological past.

In the current paper both, geometry and amplitude behavior of volcanics as seen on seismic and well data will be discussed using a number of case studies from several hydrocarbon bearing basins around the world. It summarizes previously presented ideas with special emphasis on the multidisciplinary approach required to succeed with seismic interpretation.

**Keywords:** volcanic rocks, seismic data, amplitudes, AVO

## Идентификация древних вулканогенных пород с помощью сейсмических данных

**Сабине Кларнер и Олаф Кларнер**

*ООО «Кларенко» Москва, РФ, sk@klarenco.com*

При поиске углеводородов в рифтовых бассейнах или бассейнах активных окраин часто встречаются такие литологические разновидности как вулканиты, вулканокласты или продукты их эрозионного разрушения. Присутствие таких типов отложений, образованных в результате вулканической деятельности и/или измененных при пост-вулканическом переотложении может привести к формированию диагенетически измененных пород на уровне коллектора. Частичное или полное замещение коллектора, его изменение циркулирующими горячими флюидами и добавление минеральных компонентов привели к бурению ряда сухих скважин, как при разведочных проектах, так и при разработке месторождений. Поэтому важно понимать распределение вулканитов вблизи резервуара.

Работая в разных бассейнах по всему миру, мы выявили различные особенности, которые помогают нам выявлять вулканиты и породы, связанные с вулканизмом, по сейсмическим данным. Эти особенности могут быть разделены на две основные группы: (1) амплитудные характеристики, в частности зависимость амплитуды отражения от удаления и (2) геометрии, особенно по сравнению с наблюдаемой морфологией современных вулканитов. Современные технологии сейсмической интерпретации, такие как 3D-изображение и визуализация, спектральная декомпозиция, анализ упругих свойств пород и AVO-анализ в сочетании с надлежащим геологическим пониманием современного вулканизма, открывают совершенно новые представления о геологическом прошлом.

В данной статье и геометрия, и амплитудное поведение вулканитов по сейсмическим и скважинным данным, будут рассмотрены с использованием примеров ряда проектов из нескольких углеводородных бассейнов по всему миру. В ней обобщаются ранее представленные идеи с удалением особого внимания мультидисциплинарному подходу, требуемому для успеха сейсмической интерпретации.

**Ключевые слова:** вулканогенные породы, сейсмические данные, амплитуда, AVO

## **Conclusions**

Qualitative and quantitative analysis of seismic data can provide valuable information in rift and active margin basins, where paleovolcanic activity has occurred contemporaneously with the reservoir deposition. Integrating geometries of recent surface analogs and amplitude versus offset behavior into the interpretation of the target reflections helps in identifying and mapping buried volcanic rocks and assessing their impact on the reservoir quality.

## **References**

1. *Sabine Klarner and Olaf Klarner* (2012). Identification of Paleo-Volcanic Rocks on Seismic Data, Updates in Volcanology - A Comprehensive Approach to Volcanological Problems, Prof. Francesco Stoppa (Ed.), ISBN: 978-953-307-434-4, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/updates-in-volcanology-a-comprehensive-approach-to-volcanological-problems/identification-of-paleo-volcanic-rocks-on-seismic-data>

## **Geomechanical Interpretation of Seismicity: Applications for Seismic Forecast and Hydrocarbon Exploration**

**Alexey V. Solomatin<sup>1</sup>, Sergey A. Fedotov<sup>1</sup>, Alexey V. Kiryukhin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia*

<sup>2</sup> *Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia  
alf110111@gmail.com; AVKiryukhin2@mail.ru; karetn@list.ru*

The seismic process of the Kamchatka seismoactive zone is considered from the point of view of the geomechanical concept. This concept involves active role of the fluid component [Zoback, 2010; Kissin, 2016]. Critical stresses in the seismic faults net are accompanied not only by earthquakes, but also by the formation of fluid permeability regions as the potential faults net. To identify the active faults net a technology that allows to compute flat clusters of the earthquake hypocenters is used. The analysis of the orientation of such flat clusters is used to determine the properties of the seismic process and the role of liquids in its activation.

**Keywords:** seismic process, earthquake prediction, active faults, geomechanical model

## **Геомеханическая интерпретация сейсмичности на шельфе Камчатки: приложения для сейсмического прогноза и поиска углеводородов**

**Соломатин А.В.<sup>1</sup>, Федотов С.А.<sup>1</sup>, Кирюхин А.В.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский 683006*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

В работе сейсмический процесс Камчатского участка сейсмогенной зоны рассматривается с позиций геомеханических представлений активных разломов [Zoback, 2010; Kissin, 2016]. Критические напряжения в области таких разломов выполняют ключевую роль в локальных подвижках в сейсмоактивной среде и сопровождаются не только землетрясениями, но и формированием областей флюидной проницаемости – важного элемента используемых представлений. Для выявления дискретной сети активных разломов используется методика выделения плоско-ориентированных кластеров гипоцентров землетрясений. А для выяснения геомеханического режима сейсмичности, роли флюидов в ее активизации применяется анализ ориентации таких кластеров.

**Ключевые слова:** сейсмический процесс, прогноз землетрясений, активные разломы, геомеханическая модель

### **Введение**

Для представления сейсмического процесса может быть использовано геомеханическое представление активных разломов на основе флюидодинамики [Zoback, 2010; Kissin, 2016]. Основой такой модели сейсмоактивной среды являются как критические напряжения - ключевой долговременный фактор локальных подвижек, так флюидная насыщенность среды – важнейший дополнительный и относительно кратковременный фактор. В настоящей работе в рамках указанной модели проводится анализ геомеханического режима сейсмичности и роли флюидов в ее активизации.

### **Методика поиска плоско-ориентированных кластеров землетрясений**

В качестве исходных данных для анализа использована выборка из каталога землетрясений Камчатки КФ ФИЦ ЕГС РАН, включающая 5972 события с энергетическим классом  $K_s > 10$  ( $K_s = 1.5 M + 4.6$  [Fedotov, 1972]) за период 01.1980 – 02.2016 гг. Поиск

плоско-ориентированных кластеров землетрясений осуществляется с использованием двух программ Frac-Digger и Frac-Digger2<sup>3</sup>.

Программа FRAC-Digger на основе пространственно-временной выборки упорядоченного по времени множества точек - координат гипоцентров землетрясений, осуществляет выделение близких к плоскостям их подмножеств – плоско-ориентированных кластеров. В качестве параметров – критериев создания таких подмножеств точек для каждого из них используются: минимальная величина –  $N$ ; близость по времени –  $\delta t$ ; максимальное удаление от общей плоскости –  $\delta z$ ; минимальный эквивалентный радиус горизонтальной проекции –  $\delta R$ . Программа выполняет расчет параметров плоскостей, аппроксимирующих каждое из выделенных подмножеств. Результаты расчета представляются в виде таблиц с геологическими характеристиками по каждому из выделенных плоско-ориентированных кластеров – предполагаемых плоских разломов (угол и азимут падения аппроксимирующей плоскости; эквивалентный размер горизонтальной проекции, и др. параметры).

В программе FRAC-Digger2 выборки для построения плоско-ориентированных кластеров на основе заданной пространственно-временной области осуществляются случайным образом (используется метод Монте-Карло). Это позволяет избежать зависимости решения от упорядоченности точек по времени. Дополнительными критериями значимости найденных решений являются: (1) максимальное число входящих в подмножество точек; (2) максимальная сумма атрибутивных параметров точек (которыми могут быть магнитуды землетрясений, расходы продуктивных зон и другие параметры в зависимости от задачи); (3) время, определенное в программе для выполнения процедуры выбора плоско-ориентированного кластера точек. Если проверка оказывается успешной, то кластер дополняется еще не использованными точками, также удовлетворяющими критериям плоскостной ориентации этого кластера.

Тестирование программы Frac-Digger2 на данных по продуктивным зонам трещинно-жильных геотермальных резервуаров показывает, что при охвате более 0.01% возможных комбинаций и регуляризации исходного списка продуктивных зон по притоку теплоносителя Frac-Digger2 алгоритм дает воспроизводимые результаты по геометрии продуктивных трещин.

#### **Геомеханический анализ региональной сейсмичности Камчатки 01.1980 – 02.2016 гг.**

Плоско-ориентированные кластеры землетрясений определялись программой Frac-Digger со следующими критериями:  $N = 6$ ,  $\delta t = \infty$ ,  $\delta Z = 10$  км,  $\delta R = 100$  км, соответствующими предположению о существовании дискретной системы «постоянно-активных региональных разломов». В результате выявлено 156 плоско-ориентированных кластеров, интерпретируемых в качестве сейсмоактивных разломов (рис. 1), среди которых 17 представлены 100 и более событиями. Большая часть указанных разломов находится на восточном шельфе Камчатки.

В целом преобладают разломы, параллельные линии глубоководного желоба, с углами падения  $50-70^\circ$  на  $S33$  ( $300-310^\circ$ ), при этом выделяются также разломы иного простирания и падения (стереограмма на рис. 1). Это указывает как на общие региональные геомеханические условия деформации локальных растяжений в направлении  $S33$  ( $305^\circ$ ) ( $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ ), так и существование несколько отличающихся условий, связанных, в том числе, с неоднородным геологическим строением зоны поддвига.

Рис. 1 показывает фрагмент карты работы [Kiryukhin et al., 2010], включающий район г. Петропавловск-Камчатский, и следы выявленных сейсмоактивных разломов горизонтальной плоскостью на глубине 3 км. Наиболее активные разломы показаны более жирными линиями и пронумерованы. Ближайший к г. Петропавловск-Камчатский сейсмоактивный разлом этого

<sup>3</sup> Рег. №2016616880 и №2017618050, соответственно. Область применения: выявление дискретных систем трещин по сейсмическим или геологическим данным. Подробное описание используемых алгоритмов приводится в работах (Kiryukhin et al., 2016, 2017).

класса (№ 4, его определяет кластер из 175 сейсмических событий), находится на расстоянии около 90 км от города и направлен в его сторону. На продолжении указанного разлома находятся Пиначевские источники (№ 69 на рис. 1). Этот разлом характеризуется углом падения  $53^\circ$  и азимутом падения  $217^\circ$ .

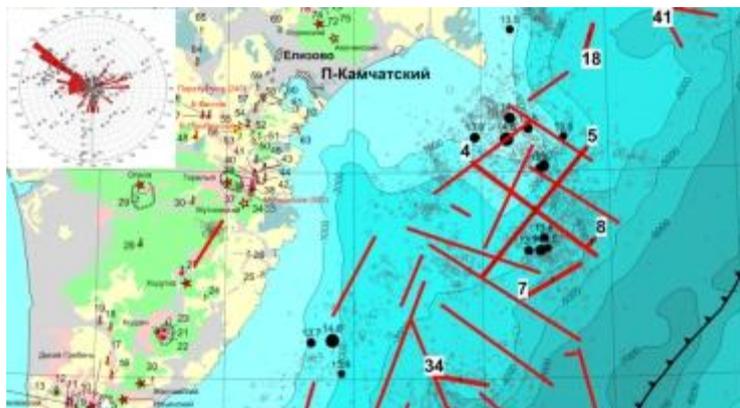


Рисунок 1 – Следы сейсмически активных разломов на плоскости глубины 3 км. Программа Frac-Diggerc параметрами  $N = 6$ ,  $\delta t = \infty$ ,  $\delta Z = 10$  км,  $\delta R = 100$  км.

### Геомеханический анализ Кроноцкого землетрясения (05.12.1997, $M = 7.8-7.9$ )

Плоско-ориентированные кластеры землетрясений, связанные с развитием очага Кроноцкого землетрясения определялись программой Frac-Digger со следующими параметрами:  $N = 6$ ,  $\delta t = 1$  сут.,  $\delta Z = 2$  км,  $\delta R = 50$  км - режим выделения «коротко-живущих разломов», которые могут быть фрагментами разломов, рассмотренных выше в разделе 3. Полученные результаты показывают, что в окрестности радиусом 45 км от эпицентра Кроноцкого землетрясения выделяются две пересекающиеся системы разломов:

(1) пологие с углами падения  $20-50^\circ$ , субмеридионального простирания (преимущественно афтершоки);

(2) крутопадающие (преимущественно форшоки) с углами падения  $70-80^\circ$  и азимутом падения ЮЗ  $220^\circ$  (рис. 2). Эта ситуация может соответствовать комбинации локальных геомеханических условий: надвигов RF ( $Sh_{max} > Sh_{min} > S_v$ ) с максимальным горизонтальным напряжением ориентированным в субширотном направлении и напряжением растяжения в направлении ЮЗ ( $220^\circ$ ) ( $S_v > SH_{max} > SH_{min}$ ).

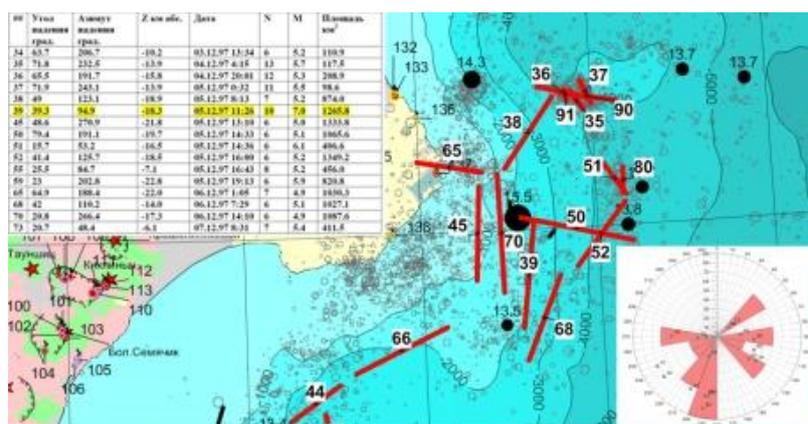


Рисунок 2 – Следы сейсмически активных разломов на плоскости глубины 15 км. Расчет Программа Frac-Diggerc параметрами  $N = 6$ ,  $\delta t = 1$  сут.,  $\delta Z = 2$  км,  $\delta R = 50$  км.

### Геомеханический анализ распределения сильнейших ( $M \geq 5.7$ ) землетрясений Камчатки (1980-2016 гг)

В качестве исходных данных для анализа использованы данные по двумстам сильным ( $M \geq 5.7$ ) землетрясениям из каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН. Плоско-ориентированные кластеры землетрясений определялись программой Frac-Digger2 со следующими критериями отбора:  $\delta t = \infty$ ,  $\delta Z = 4$  км,  $\delta R = 100$  км,  $K = 5$ . В результате установлено, что 102 из 200

сильных землетрясений Камчатки формируют одиннадцать плоско-ориентированных кластеров, залегающих преимущественно на глубинах до 40 км (рис. 3). В этой связи напрашивается вывод о возможности флюидного механизма генерации сильнейших землетрясений на шельфе Камчатки. Аномально высокие поровые давления могут циклически возникать в изолированных резервуарах, распространяться по разломам [Kissin, 2016] и служить триггерами как отдельных сейсмических активизаций, так и повторяющихся достаточно регулярно [Fedotov, 2005] катастрофических землетрясений. Зафиксированные на восточном шельфе Камчатки разгрузки метана и отложения газогидратов [Seliverstov, 2009] указывают на возможность участия в этом процессе углеводородов.

### Выводы

(1) Выявленные в работе по данным региональной сейсмичности плоско-ориентированные кластеры гипоцентров землетрясений интерпретируются в качестве сейсмоактивных разломов. Среди них 17, характеризующихся наиболее высокой сейсмической активностью. Ближайший к г. Петропавловск-Камчатский сейсмоактивный разлом этого класса находится на расстоянии около 90 км от города и направлен в сторону города. В целом преобладают разломы, параллельные линии глубоководного желоба, с углами падения  $50-70^\circ$  на ЗСЗ ( $300-310^\circ$ ). Выделяются также разломы иной ориентации.

(2) На примере Кроноцкого землетрясения (05.12.1997 г.) показано, что кластеризация с существенным изменением геомеханического состояния от условий растяжения NF до условий сжатия RF существует в очагах сильных землетрясений в интервале времени последних форшоков и первых афтершоков.

(3) Кластеры 102 из 200-ти наиболее сильных землетрясений Камчатки формируют одиннадцать плоско-ориентированных площадок площадью от 1600 до 5400 км<sup>2</sup> на восточном шельфе вдоль побережья Камчатки на глубинах преимущественно 40 км.

(4) Плоско-ориентированное залегание сейсмоактивных площадок позволяет предполагать флюидный (вода, нефть, газ) механизм генерации сильнейших землетрясений в них.

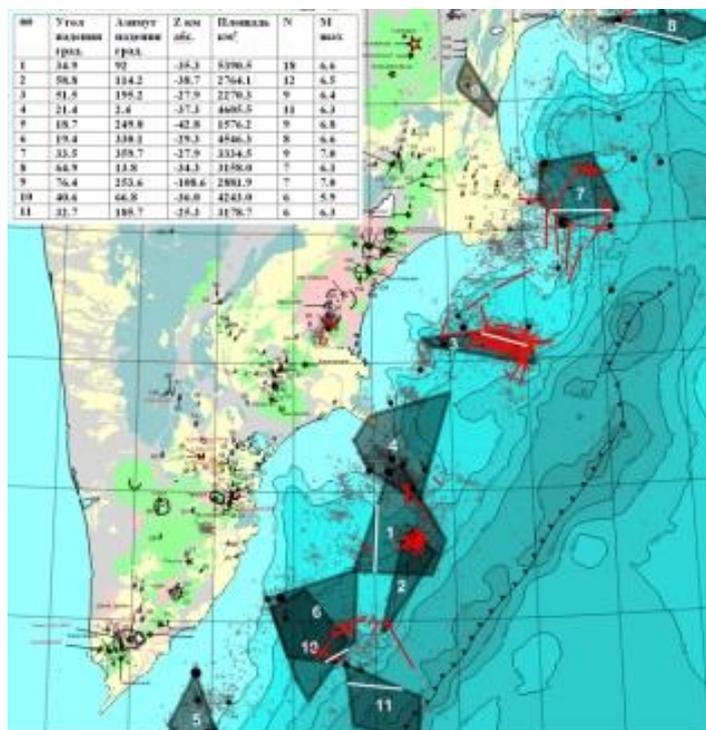


Рисунок 3 – Проекция одиннадцати плоско-ориентированных кластеров, включающих эпицентры 102 из 200 сильнейших землетрясений Камчатки. Расчет выполнялся по программе Frac-Digger2 с параметрами  $\delta t = \infty$ ,  $\delta Z = 4$  км,  $\delta R = 100$  км,  $K = 5$ . Показаны также следы «коротко-живущих локальных разломов», изображенных на рис. 2.

## **References**

1. *Fedotov S.A.* Long-term earthquakes forecast for Kurile-Kamchatka island arc. Moscow, Nauka publ., 2005, 302 p. (in Russian)
2. *Fedotov S.A.* Energy classification of the Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes. Nauka, Moscow, p 116 (in Russian).
3. *Kiryukhin A.V., Kiryukhin V.A., Manukhin Y.F.* Hydrogeology of Volcanogenic areas \\ S-Peterburg, Nauka, 2010, 395 p. (in Russian)
4. *Kiryukhin A.V., Fedotov S.A., and Kiryukhin P.A.:* A Geomechanical Interpretation of the Local Seismicity Related to Eruptions and Renewed Activity on Tolbachik, Koryakskii, and Avacha Volcanoes, Kamchatka, in 2008–2012, *Journal of Volcanology and Seismology*, 10(5) (2016) p.275–291.
5. *Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., Voronin P.* «Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia)», *Geofluids*, vol. 2017, Article ID 4279652, 21 pages, 2017. doi:10.1155/2017/4279652.
6. *Seliverstov N.I.* Geodynamics of junction Kurile-Kamchatsky and Aleuthian island arcs. KamGU, P-Kamchatsky 2009, 191 p. (in Russian).
7. *Kissin I.G.* Fluid regime in the source and preparation area of an earthquake, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2016. T. 52. № 5. C. 723-739.
8. *Zoback, M.D.* Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. 448 p.

## SECTION IV. MODELING THE EXPLOITATION OF GEOTHERMAL RESERVOIRS IN VOLCANIC AREAS. PROBLEMS OF USING GEOTHERMAL ENERGY IN VOLCANIC AREAS FOR HEAT AND ELECTRICITY SUPPLY

### РАЗДЕЛ IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ. ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

УДК 251.233.556.3

#### Hidden volcanism in the Paratunsky geothermal field

Larisa A. Vorozheikina, Natalya P. Asulova, Natalya V. Obora

*АО Тепло Земли, Паратунская, 4, пос. Термальный, Елизовский район, Камчатский край, Россия  
lvorogeikina@burgeo.kamchatka.ru*

Paratunskoye nitric term deposit (which is in operation since 1967) is the most studied in Kamchatka. The deposit is located in the Paratunka River valley, oriented subparallel to the planetary fault off the eastern shores of Kamchatka NE 20°, and has the character of a fracture-vein water-pressure system. An idea of the formation of nitrogen terms at the expense of regional conductive heat flux, the heating of infiltration water penetrating to depth is most common. However, the He<sup>3</sup> / He<sup>4</sup> isotopic ratios in the nitrogen terms of Iceland indicate the participation in the heating of the deep coolant. Hydrogeologists of Kamchatka are inclined to believe that convective introduction of deep heat into the water-pressure systems. The discussion of the problem of deep-seated fluids led researchers to conclude that there exist concentrated core heat carriers and substances capable of heating rocks, up to their melting - the concept of juvenile fluids (V.V. Averbeyev and others). The idea was developed that the hydrothermal process and active volcanism are inherently united, and this vividly demonstrates the commonality of their manifestation in the volcanic belts of Kamchatka (East Kamchatka, Middle Kamchatka).

Apparently, the difference between them is determined by the magnitude of the impulse of the deep coolant.

**Keywords:** Hydrotherms, volcanism, well, rift, crater, dike, Holocene

#### Предполагаемый скрытый вулканизм на Паратунском геотермальном месторождении

Ворожейкина Л. А., Асаулова Н. П., Обора Н.В.

*АО Тепло Земли, Паратунская, 4, пос. Термальный, Елизовский район, Камчатский край, Россия*

Паратунское месторождение представлено азотными термами, имеет характер трещинно-жильной водонапорной системы. Воды этого типа отличаются постоянным газовым составом (до 98% N<sub>2</sub>), низким газосодержанием. Наиболее распространено представление об их формировании при нагреве инфильтрационных вод, проникающих на глубину, за счёт регионального кондуктивного теплового потока. Однако изотопные отношения He<sup>3</sup>/He<sup>4</sup> в азотных термах Исландии свидетельствуют об участии в их нагреве глубинного теплоносителя (Кононов, Мамырин и др., 1974). Гидрогеологи Камчатки склоняются к мнению о конвективном привносе глубинного тепла в водонапорные системы [4]. Обсуждение проблемы глубинных флюидов привело исследователей к выводу о существовании концентрированных коровых переносчиков тепла и вещества, способных осуществлять прогрев пород, вплоть до их плавления, - концепция ювенильных флюидов (Уайт, 1965; Аверьев, 1969; Кононов, 1974; Манухин, 1976; Вакин и др., 1979). Гидротермальный процесс и активный вулканизм по своей сути едины и это наглядно демонстрирует общность их проявления в вулканических поясах Камчатки; отличие определено импульсом глубинного тепла

**Ключевые слова:** гидротермы, вулканизм, скважины, разломы, голоцен.

Паратунское месторождение азотных терм является наиболее изученным на Камчатке, находится в эксплуатации более 50 лет. Месторождение приурочено к грабенообразной структуре долины р. Паратунки, ориентированной в направлении ССВ 20°, субпараллельнопланетарному разлому у восточных берегов Камчатки [7], рис. 1.

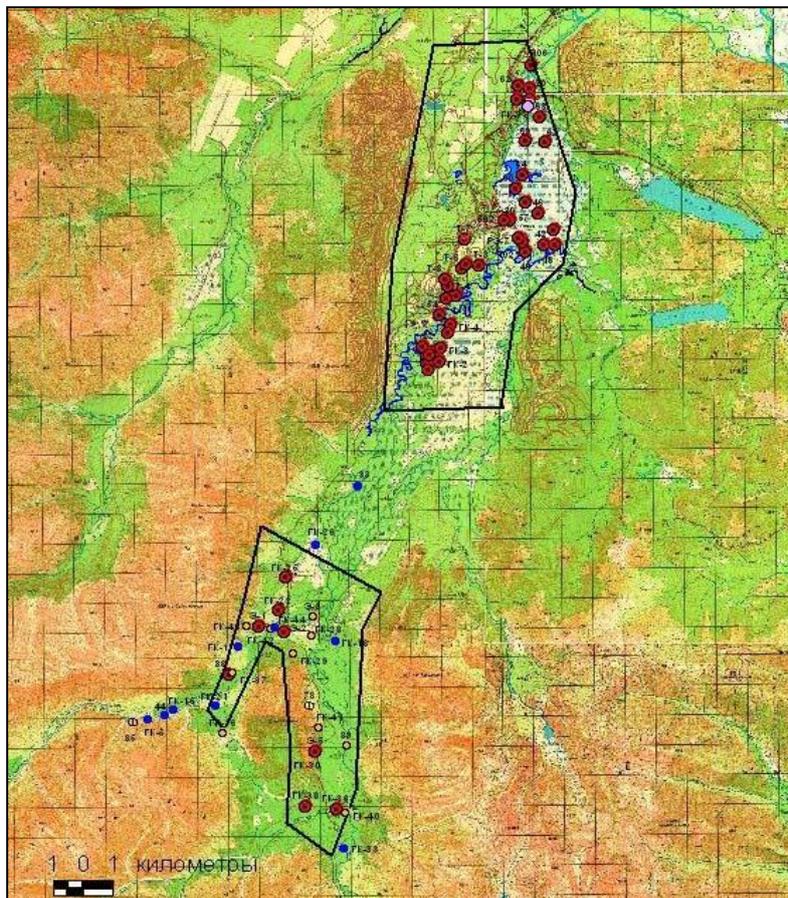


Рисунок 1 – Схема расположения Паратунского и Верхне-Паратунского месторождений в долине р. Паратунки

В тектонической схеме Г.М. Власова территория месторождения относится к Центрально-Камчатской зоне вулканизма; сопряжена с западной окраиной Восточно-Камчатского вулканического пояса; находится вблизи узла сейсмогенной активности, выделенной в акватории Авачинской губы [6]. По материалам съёмочных работ масштаба 1:50000 С.И. Федоренко (1968) подразделил зоны разломов листа N-57-XXVII на ортогональные и диагональные, при этом отметил, что только для группы диагональных разломов характерны активные перемещения в *голоцене* [11].

Продуктивная площадь месторождения приурочена к зоне интерференции Авачинской и Быстринской ВТС 2-го порядка. По В.А. Соколку (1995), «кольцевые структуры 2-го порядка занимают особое положение на полуострове. Заложение этих структур связывается с наиболее активным формированием ВТС в новом, сугубо континентальном качестве. В общем плане они образуют цепочки ССВ и СВ направления» [9].

Зона *рифтогенеза* представлена на месторождении субмеридиональным *Центральным* разломом - фрагментом Центрально-Камчатского рифта, разделившим месторождение на две половины: восточную - участки Нижний, Северный и западную - участки Микижа, Светлячок, Промежуточный, Средний (рис. 2). На западном фланге месторождения И.К Рундквист выделена *Паратунско-Пиначевская сейсмогенная зона разуплотнения*, в рамках которой субмеридиональный разлом *Западный* объединил термоаномалии Среднего и Промежуточного участков [9].

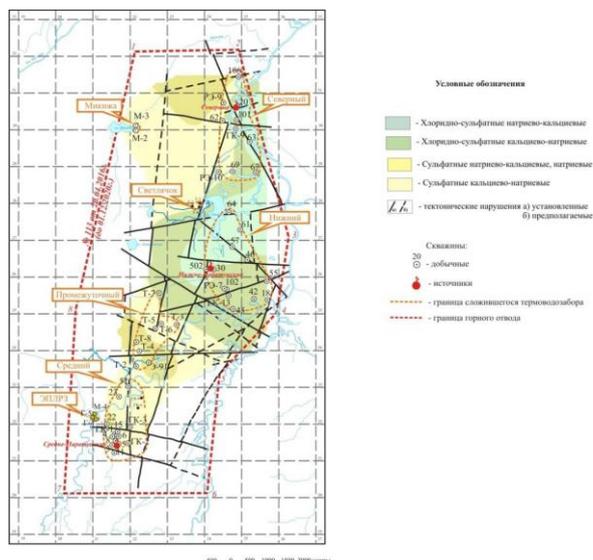


Рисунок 2 – Геолого-гидрогеологическая схема Паратунского месторождения

Продуктивные скважины тяготеют к днищу грабена р. Паратунки (рис. 3). Современные открытые СВ зоны разломов на отдельных участках пересекают грабен, создавая линию излома его границ, на таких участках находятся наиболее продуктивные скважины. В районе Северного участка ССВ ориентировка грабена р. Паратунки меняется на СВ 50°, в направлении вулканов Авачинский, Корякский. Это направление характерно для тектонических зон, сопровождающих планетарный разлом у восточных берегов Камчатки, субпараллельно глубинному Курило-Камчатскому разлому, линиям максимальной сейсмичности, значениям теплового потока, зонам вулканизма, сейсмофокальной зоне. В районе работ направление разломов СВ 50° контролирует современные открытые зоны раскола, плохо проявленные в рельефе, но важнейшие для транзита метеорных вод к месторождению.

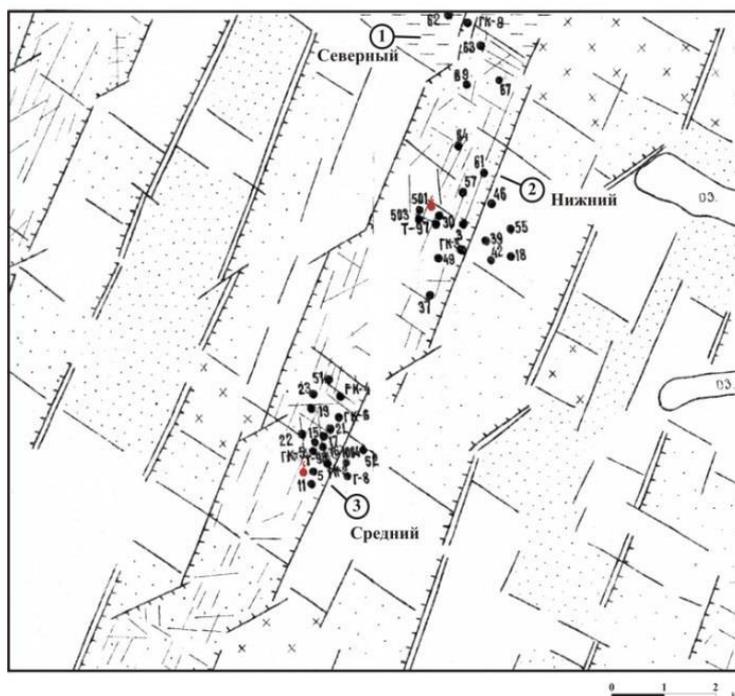


Рисунок 3 – Схема расположения продуктивных скважин на основных участках Паратунского месторождения (по материалам дешифрирования АФС А.В. Соколкова, 1995[9]г.

**Геотермические особенности** Паратунского месторождения характеризуются крайней степенью неоднородности: высокоградиентные участки сменяются

малогradientными, положительные аномалии отрицательными, безgradientные зоны перетоков площадками калориметрического смешивания, - передача тепла осуществляется преимущественно конвективным способом. Отрицательные gradientы несут информацию о направлении движения термальных вод в зонах растекания. Подобные участки использованы группой сотрудников Казанского университета (для расчёта возраста Паратунского месторождения *геотемпературным* методом, - расчётное значение возраста составило ~ 6500 лет, что сопоставимо со временем проявления последней вспышки вулканизма на Камчатке [10]. Отсутствие теплового равновесия в системе, наличие трещин в водоупоре свидетельствует о том, что термовмещающие трещины возникли после образования четвертичных отложений и расчётное значение возраста месторождения является вполне реальным приближением.

Распределение температур по глубине хорошо увязывается со структурными особенностями месторождения. Основная особенность его продольного геотемпературного разреза - тенденция ступенчатого погружения высоких температур от Среднего участка к Северному. Подобный характер имеет уклон коренного ложа депрессии и распределение напоров на основных участках: Средний - 43,9 м, Нижний - 36,5 м, Северный - 32,5 м [11].

**Водное питание.** По результатам многочисленных изотопных анализов водорода, кислорода установлено, что формирование метеорных вод Паратунского месторождения происходит, в основном, за пределами бассейна р. Паратунки, на отметках порядка 1500 м [Лаб. ИВ ДВНЦ АН РФ, 2018].

Предполагается, что транзит метеорных вод к Паратунскому месторождению осуществляется, в основном, по новейшим трещинам раскола СВ 50°, формирующим своеобразную дренажную систему, благодаря которой подземные воды могут перемещаться на многие сотни км, в виде восходящих и нисходящих потоков или скапливаться в определённых структурах, в цикличном режиме влиять на особенности фильтрации подземных вод месторождения.

По результатам *специального структурно-геоморфологического* анализа отмечена чёткая приуроченность Паратунских терм к послеорогенной структуре, предположительно, по причине связи с современными зонами растяжения (рис. 4). Обращено внимание на исключительное положение *Паратунско-Банной* зоны субширотных разломов в послеорогенной структуре Камчатки. Являясь трансзональной и трансостровной, Паратунско-Банная линия отслеживается далеко к востоку, определяя положение бровки шельфа и континентального склона, влияя в целом на плановые очертания территории Камчатки [9]. Гипоцентры землетрясений глубже 100 км образуют полосы субширотного простирания, совпадающие с субширотными зонами или лежащими на их продолжении [9].

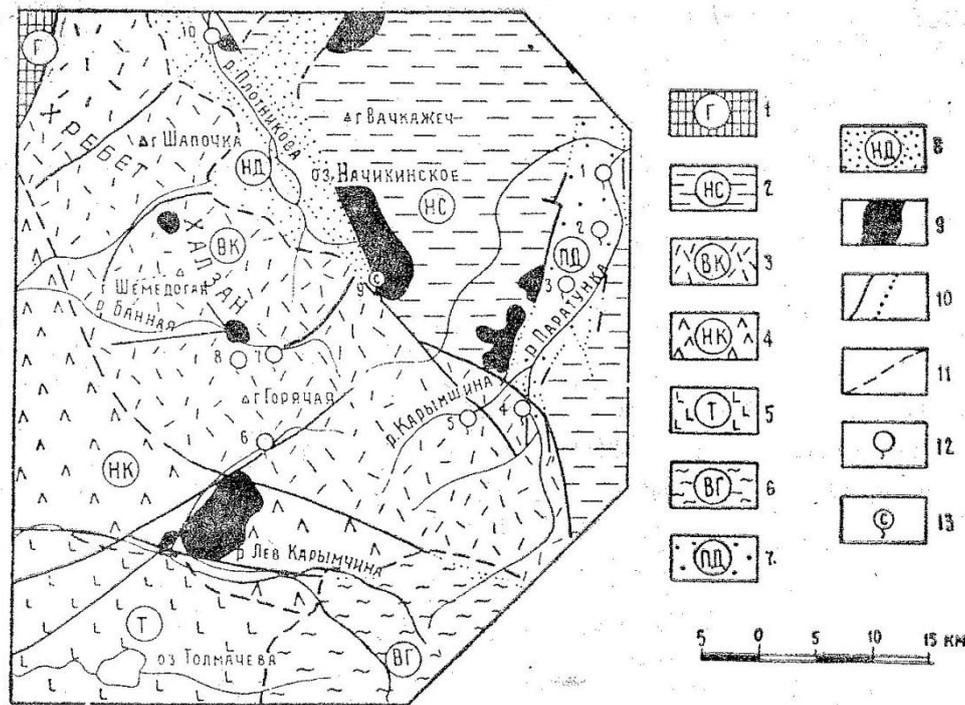


Рисунок 4 – Геолого-тектоническая схема Паратунского геотермального района (по материалам авторов - С.Е. Априлкова, В.М. Бондаренко, Ю.А. Краевого, Ю.Ф. Манухина, В.Г. Охапкина)[4]:

1 – Метаморфическая зона Ганальского хребта; 2 – Начикинская складчато-глыбовая зона; 3 – Верхнекарымчинская вулканическая зона; 4 – Нижнекарымчинская вулканическая зона; 5 – Толмачевская область ареального базальтового вулканизма; 6 – северная окраина вулкана Горелого; 7 – Паратунская депрессия; 8 – Начикинская депрессия; 9 – наиболее крупные интрузии; 10 – важнейшие разрывные нарушения; 11 – границы структурных зон; 12 – современные гидротермы; 13 – разгрузка минеральных холодных вод. Источники: 1 – Северно-Паратунские; 2 – Нижнепаратунские; 3 – Среднепаратунские; 4 – Верхнепаратунские; 5 – Карымшинские; 6 – Карымчинские; 7 – Большебанные; 8 – Малые Банные; 9 – разгрузка углекислых сульфатных вод ручья Начикинского; 10 - Начикинские

В плане площадь Паратунского месторождения тяготеет к заболоченной пойме низовьев р. Паратунки, имеет полудуговую форму, открытую в направлении горста Тополового. Подобная форма повторяется в элементах рельефа (рис.5).

По результатам специального структурно-геоморфологического анализа, выполненного Н.П. Костенко (1995), в низовьях рек Паратунка и Левая Быстрая выделена общая обширная палеоструктура Паратунско-Быстринской ВТС [9]. В центре вулканотектонической палеоструктуры со временем вырос, и продолжает расти, хребет Тополовый и одноимённый горст. Активизация процесса вулканизма в голоцене совпала по времени с проявлением посткальдерного вулканизма, в том числе на территории Паратунского месторождения, - на кромке кратерной структуры палеоструктуры ВТС. По времени это соотносится со временем формирования Паратунского месторождения и естественных термопроявлений (Северные, Нижние, Средние), подобных «горячим точкам» на поверхности и, одновременно термоаномалиям на глубине. Обращает внимание тот факт, что в течение длительного периода эксплуатации месторождения контуры термоаномалий меняли ориентировку главной оси от субмеридиональной к СЗ и позже к субширотной, как бы демонстрируя влияние левостороннего разворота структур по мере углубления воронки депрессии и воздействия всё более глубоко проникающих открытых трещинных зон на локализацию гидротерм.

Но при этом термоаномалии скважин всегда концентрируются вблизи естественных термопроявлений, что может свидетельствовать о наличии "восходящих струй" природного

теплоносителя по открытым круто наклонным каналам. Один из таких субвертикальных крутонаклонных к ЮЗ каналов выявлен М.Д. Сидоровым (1995 г.) геофизическим методом на Нижнем участке, в междуречье рр. Паратунка-Хайкова. [9].

Проявления *скрытого вулканизма* на месторождении рассматриваются относительно участков Средний и Нижний. Впервые на это явление обратили внимание А.И. Серёжников, В.М. Зимин (1968): в процессе тщательного изучения керна скважин Среднего участка. Установлено, что в районе термальной площадки, эффузивно-пирокластические образования насыщены многочисленными рвущими и пластовыми телами дацитов, андезитов, диоритовых порфиритов. Концентрация тел с эруптивными брекчиями в центральной части блока расценена как «признак магмоподводящего канала миоценового вулканического аппарата» [4,11]. В *парагенезисе* с ним рассмотрен субвертикальный термальный поток, с которым связывается очаг естественной разгрузки участка Среднего, при этом, на небольшой термальной площадке и рядом с ней, было пробурено 14 скважин, - все они оказались продуктивными.

Глубинное поступление газа на данном участке подтверждено результатами изотопных анализов. По изотопным соотношениям гелия  $He^3/He^4$  в скважине ГК-1 Среднего участка доля мантийного гелия составила 23%, корового 69%, атмосферного 8% (Каменский, 1976), подобно азотным термам Исландии (Кононов и др., 1974).

Участок *Нижний* является центральным на месторождении. Он характеризуется широким площадным развитием термальных вод и неожиданными вспышками высоких температур - до 106 °С, в скважинах, что объясняется относительно молодой структурой участка, по Ю.Ф. Манухину [4].

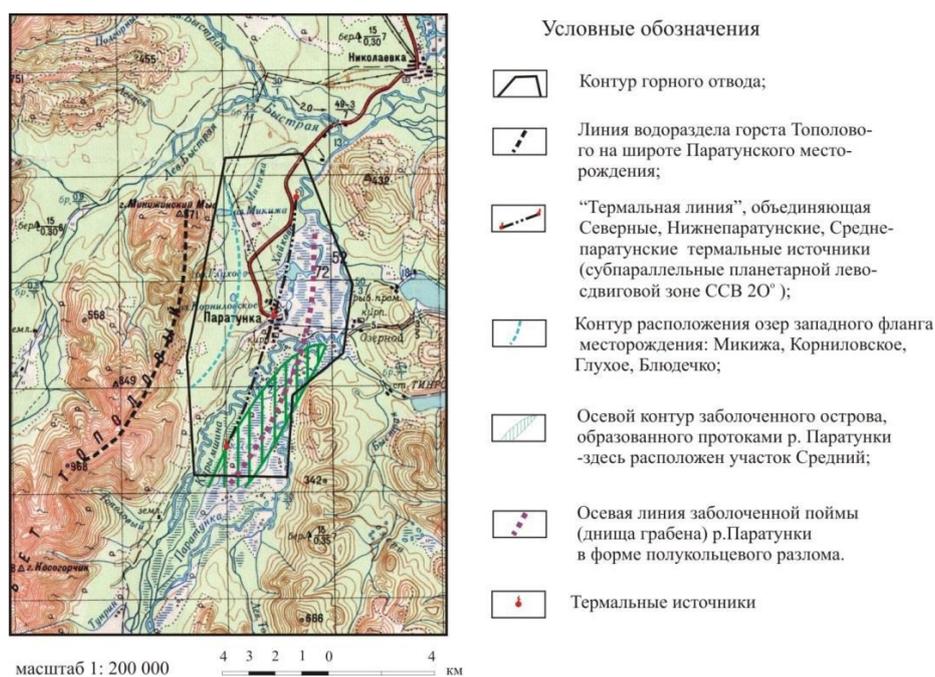


Рисунок 5 – Некоторые элементы структурного контроля Паратунского месторождения

Обращает внимание тот факт, что, по данным термометрии, 95 и 100-градусная изотермы прослеживаются только на Нижнем участке, они примыкают к субширотной зоне корового происхождения и к рифтовой зоне Центрального разлома, - тем самым подчеркнута ведущая роль глубинных процессов в формировании термоаномалий данного участка.

Наиболее надёжные сведения о температурах на глубине получены по результатам термометрии скважин, но в последние годы она не выполнялась, - характер изменения температуры на глубине (~2 км) во времени отслежен нами по расчётным значениям

силикатного геотермометра  $T_{si}$  (рис. 6). Корреляция между фактическими температурами и содержанием  $SiO_2$  в термальной воде высокая,  $r=0,7$  [11].

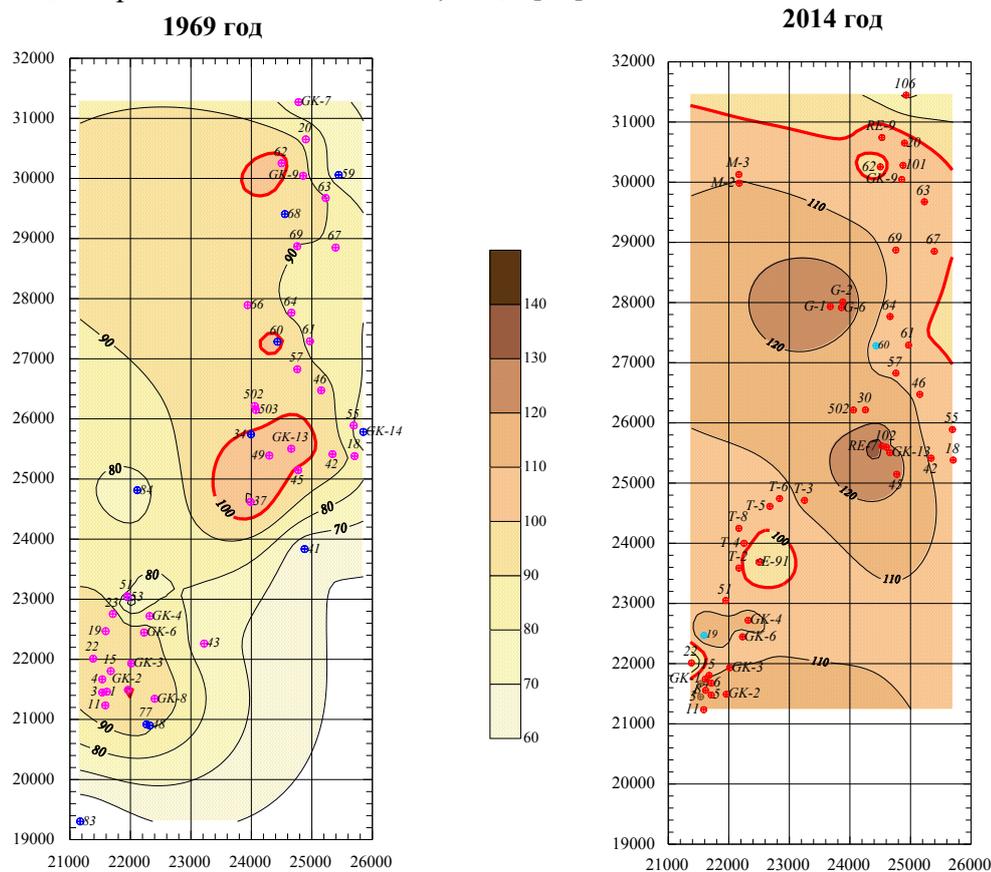


Рисунок 6 – Изменения в показаниях силикатного геотермометра по Паратунскому месторождению термальных вод во времени (1970-2014 гг.)

Сравнение показаний  $T_{si}=100^{\circ}C$  во времени (1969-2016гг.) позволяет отметить, что в районе Нижнего участка площадь 100-градусной термоаномалии намного увеличилась, при этом СЗ ориентировка главной её оси аномалии сохранилась, подчеркивая термоконтролирующую роль СЗ зоны разлома. За полувековой период эксплуатации месторождения положение центра аномалии остаётся сконцентрированным вблизи термальных источников.

При комплексном рассмотрении результатов *геофизических* исследований отслежена открытая зона СВ  $50^{\circ}$  в направлении от верховьев рр. Овражья-Поперечнаяк слиянию рр. Карымшина-Паратунка, объединяющая Карымшинские, Средние, Нижние источники. В районе скв. РЭ-7 установлена наиболее глубоко проникающая трещинная зона [9].

На основании вышеизложенного можно предположить наличие на Нижнем участке тела внедрения относительно приближенного к поверхности в районе скв. РЭ-7 ( $T_{изл}=100^{\circ}C$ ), ориентированного в СВ направлении и расположенной вблизи субширотного разлома корового происхождения. Аналогичная схема контроля термопроявления прослежена для теплового очага соседнего (в 20 км) Больше-Банного месторождения перегретых вод, где зоны контактов базальтовой дайки с вмещающими породами служит хорошо проводящим каналом для высокотемпературных гидротерм ( $T_{max}=171,5^{\circ}C$ ) [4].

Паратунское месторождение освоено в пределах верхнего реологического уровня (до 1500 м). Перспективному планированию водоотбора природного теплоносителя на месторождении должно предшествовать доизучение его на глубину не менее 3,5-4 км (в пределах среднего реологического уровня). Возможна этажность в строении месторождения.

Ниже перечислены некоторые *дополнительные признаки*, имеющие отношение к вышеупомянутому проявлению скрытого вулканизма на **Нижнем** участке:

- Наличие брахиантиклинальной структуры, по Л.Т. Наумову, 1969.
- Относительно молодая структура участка, по Ю.Ф. Манухину, 1968; 1976.
- Локализация естественных термопроявлений в напряженных тектонических узлах, на пересечении субширотных зон корового происхождения и современных зон раскола СВ 50°, по В.А. Соколку; Н.П. Костенко, 1995.
- Наличие радиальных разломов, по А.В. Кирюхину, 2018.
- 110-градусная изотерма на глубине 760 м абс. наблюдается только на Нижнем участке, - по материалам термометрии скважин месторождения в 60-70 годы.
- Максимальная температура самоизлива  $T=100$  °С и наиболее глубоко проникающая трещинная зона наблюдается для скв. РЭ-7.
- Устойчивый во времени максимальный темп увеличения содержания хлора (рис. 7) прослежен на Нижнем участке (на Северном участке его содержание стабилизировалось в последние годы). Здесь же отмечено повышенное содержание  $CO_2$  в зоне термоаномалии (скв. 30, 45, РЭ-7, ГК-13); обстановка Eh восстановительная (восходящие глубинные потоки)- в скв. 30, 502; значения соотношения  $Cl/Rb$  максимальные, - как признак малой степени разбавления глубинных вод; изотопный состав углерода  $\delta^{13}C$  для источника Нижнего составил -7 %, подобно магматическому углероду, по О.В. Чудаеву, 2000 [8].
- Повышенное содержание  $H_2$ , He, Ar,  $CH_4$ ,  $CO_2$  отмечено в газовом составе скважины РЭ-7, -относительно газового состава терм глубокой скв. 101 Северного участка, где водоприток вскрыт на глубине 2500 м.
- Максимальные концентрации Cu, Zn, Pb, Bi, Ba, Br, Cz, U в скважинах и наиболее широкий спектр микрокомпонентов наблюдается на Нижнем участке, по О.В. Чудаеву, 2016 – полевые исследования.
- На графиках соотношения значений основных генетических коэффициентов  $Cl-SO_4$ ,  $Cl-Na$  наблюдается обособленность некоторых скважин Нижнего участка относительно остальных скважин месторождения и их общность с термами Больше-Банного (скв. 1), Озерновского (скв.2) месторождений (рис. 8). При этом большинство скважин Паратунского месторождения находится на одной прямой с термальными водами скважины 101, вскрывшей глубинные воды, - предполагается единство исходного гидротермального раствора на месторождении, при этом обособлена группа скважин Нижнего участка, для которой химический состав гидротерм приближен к термальным водам соседнего Больше-Банного месторождения перегретых вод, а по изотопному составу водорода, кислорода термальные воды относятся к наиболее лёгким на месторождении, по В.А. Кирюхину, 2018.
- Скважины по разным участкам отличаются разной степенью метаморфизма гидротермального раствора. Наиболее разбавлены термальные воды западного фланга месторождения (Средний, Промежуточный участки  $M=0,8-1,3$  г/дм<sup>3</sup>). Наиболее минерализованы термальные воды глубокой скв. 101, для которой  $M=3,4$  г/дм<sup>3</sup>, 2018 г.

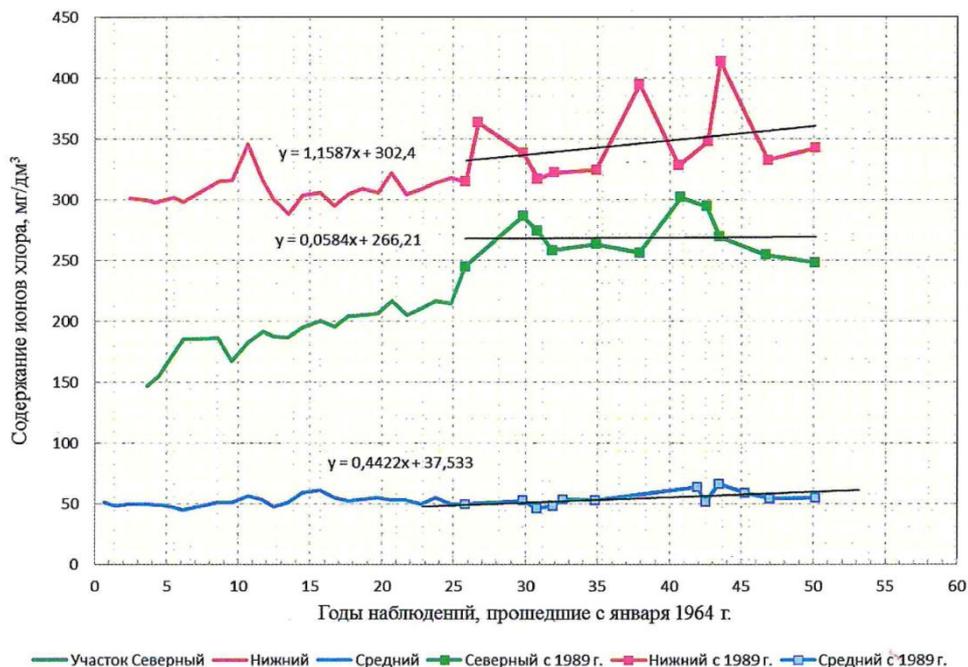


Рисунок 7 – График изменения во времени средних значений содержания ионов хлора по разным участкам месторождения

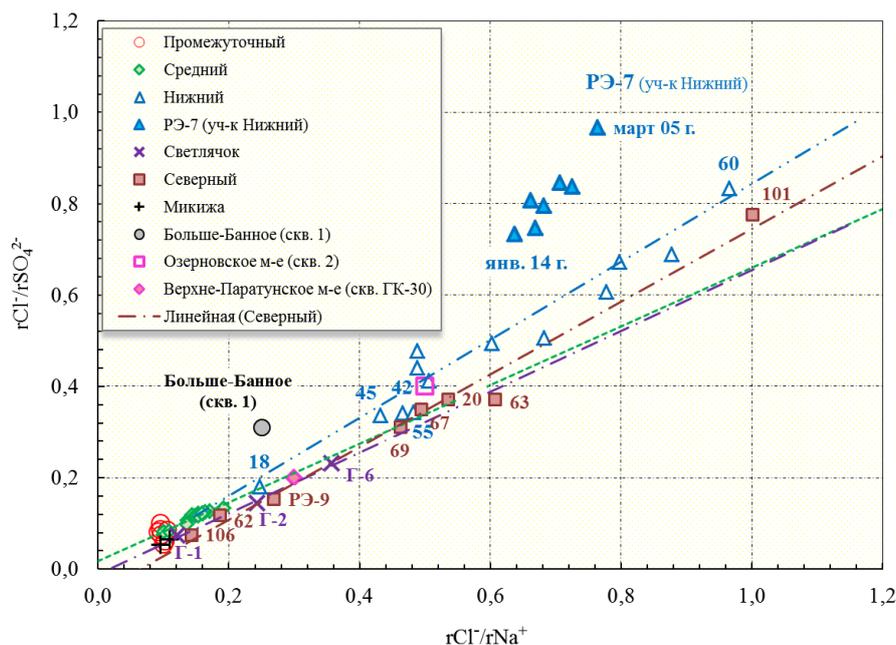


Рисунок 8 – Соотношение генетических коэффициентов в термальных водах Паратунского месторождения

### Итоги

- Паратунское месторождение расположено на ЮВ окраине Термального рифта СВ ориентировки [5], прослеженного в направлении вулканов Опала-Корякский, объединившего несколько разведанных геотермальных месторождений: – Больше-Банное, Карымчинское, Малкинское, Апачинское, Начикинское, Кеткинское, Налычевское.

- Проявления скрытого вулканизма наблюдаются на территории Среднего и Нижнего участков, вблизи одноимённых естественных термопроявлений, основной контроль которых связан с пересечением субширотных зон разломов корового происхождения с современными зонами раскола СВ 50°, активными в голоцене, в напряженных тектонических узлах.

- На *Среднем* участке скрытый вулканизм установлен по керну скважин, разбуренных вблизи термальной площадки; на *Нижнем* участке, - по результатам комплексных поисково-разведочных работ, специальных гидрохимических исследований и мониторинга скважин месторождения.

- Территория Паратунского месторождения находится в зоне активного вулканизма, здесь, на момент последней вспышки вулканизма в голоцене, сложились благоприятные предпосылки для проявления посткальдерного вулканизма на кромке обширной кратерной палеоструктуры Паратунско-Быстринской ВТС, территориально относящейся к низовьям долин рек Паратунка, Левая Быстрая и смежной с ними территории. Возраст месторождения сопоставим с крупными геотермальными объектами Камчатки, равен ~5300 лет.

- Проявления скрытого вулканизма подобны "горячим точкам" на обширной неравномерно прогретой площади месторождения трещинно-жильного типа.

- Месторождение изучено до глубины 1500м, что соответствует верхнему реологическому уровню. Прогнозированию ресурсов на глубину должно предшествовать доизучение его на глубину (~3,5-4,0 км). Предполагается этажность в строении месторождения.

- Схема формирования Восточно-Камчатского и Срединно-Камчатского вулканических поясов Камчатки, предположительно, аналогична схеме формирования Паратунского месторождения, но, в этом случае, поствулканизм проявлен на кромке кратера современного формирующегося трещинного линейного супервулкана (по материалам Международной геотермальной конференции, П-К. 2018).

### **Список литературы**

1. *Аверьев В.В.* Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью // кн. Современный вулканизм. М, Наука. 1966.
2. *Вакин Е.А., Кутыев Ф.Ш.* Глубины генерации флюидной составляющей современных гидротерм // Кн. Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М, Наука. 1979.
3. *Ворожейкина Л.А., Асаулова Н.П., Обора Н.В.* Гидрогеотермические особенности Паратунского месторождения термальных вод // П-К. межд. геотерм.конфер., 2017.
4. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки, кн. //Вл-к АН СССР ДВНЦ. 1976.
5. Действующие вулканы Камчатки, т.1-2 // М. Наука, 1991.
6. *Дмитриев В.Д., Ежов Б.В.* К вопросу о происхождении Авачинской губы // Вop. географии Камчатки. Вып.7, П-К, 1977.
7. *Уткин В.П.* Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование // М. Недра, 1989.
8. *Чудаев О.В. и др.* Геохимия вод основных геотермальных районов Камчатки // Вл-к. Дальнаука. 2000.
9. *Ворожейкина Л.А., Соколов В.А., Сидоров М.Д. и др.* ОМР по применению геологоструктурных, гидрогеологических, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях // п. Термальный, 1995 - Фонды ФГУ ТФИ.
10. *Непримеров Н.Н., Штанин А.В.* Научно-исследовательская работа по теме: Гидродинамические и термические исследования Паратунского месторождения термальных вод // Казанский университет. 1970- Фонды ФГУ ТФИ.
11. *Пащенко Л.Г. и др.* Отчёт о результатах детальной разведки Северного, Нижнего и Среднего участков Паратунского месторождения термальных вод...(с подсчётом эксплуатационных запасов по состоянию на 25 ноября 1968 г.) // г. Елизово.1968 - Фонды ФГУ ТФИ.

## Conditions of water and heat recharge of the Mutnovsky production geothermal reservoir (Kamchatka, Russia)

Andrey Y. Polyakov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia*  
[pol@kscnet.ru](mailto:pol@kscnet.ru)

The Mutnovsky geothermal area is part of the Eastern Kamchatka active volcano belt. Mutnovsky, 80 kY old and an aging strato-volcano, acts as a magma and water injector into a 25-km-long North-Mutnovsky extension zone. The recharge from the Mutnovsky volcano crater glacier (+1500 to +1800 masl) through the Mutnovsky-3 funnel into the production geothermal reservoirs was confirmed by water isotopic ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) data of the production wells at an earlier stage of exploitation and sodium chloride hot springs in adjacent areas. There are indications of heavier isotopic water (local groundwater in the top) infiltration into the geothermal reservoir after 12 years of exploitation.

**Keywords:** Kamchatka, isotopes, water, reservoir, geothermal, springs

## Условия водного и теплового питания Мутновского продуктивного геотермального резервуара (Камчатка, Россия)

Поляков А.Ю.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, б. Пийна 9, 683006*

Мутновский геотермальный район является частью Восточного Камчатского действующего вулканического пояса. Вулкан Мутновский (80 тыс. лет) это стратовулкан, состоящий из 4-х конусов, действует как инжектор магмы и воды в Северо-Мутновскую зону протяженностью 25 км. Водное питание продуктивных резервуаров происходит при таянии ледника Мутновского вулкана (1500 м абс. до 1800 м абс.), что подтверждается данными изотопного состава ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) теплоносителя эксплуатационных скважин до начала эксплуатации. После 12 лет эксплуатации резервуара отмечено утяжеление изотопного состава теплоносителя ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ), что является признаком проникновения локальных метеорных вод в него.

**Ключевые слова:** Камчатка, изотопы, вода, резервуар, геотермия, источники

The Mutnovsky geothermal area fluids are presented in single-phase conditions or in two-phase conditions depending on temperature and elevation. Most of the thermal features discharged at elevations below 300 masl are sodium chloride thermal springs with temperatures from 75 to 100 °C (Nizhne-Zhirovskoy, Voinovsky, Verkhne-Zhirovskoy and Vilyuchinsky springs), the thermal features discharged at elevations above 500 masl are steam jets or steam condensate springs (North Mutnovsky West and East, Dachny, Medveji, Verkhne-Mutnovsky, Radonovy condensate spring, and the most prominent gas-steam output is in Mutnovsky volcano's craters (Active Crater, Donnoye Pole and Upper Field. This phase transition is also characteristic of production wells; shallow wells with a bottom above 0 masl (wells 26 and 016) or high-temperature wells (035) produce steam-dominated fluids, while others are two-phase fluid producers (Kiryukhin, 1993).

Production reservoir fluids are characterized by sodium-chloride-sulfate composition and low TDS from 630 to 1300 ppm. Major non-condensable gases (NCG) included CO<sub>2</sub> 73%, H<sub>2</sub>S 8% and N<sub>2</sub> 19% in average. NCG concentrations varies from 1600 to 2400 ppm in steam dominated wells (O16 and 26), while less values in the range from 20 to 515 ppm in two-phase production wells were observed.

Isotopic composition ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) of meteoric waters in the Mutnovsky area generally follows Craig's meteoric line  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$  (Kiryukhin et al, 1999).

The Vulcannaya River, which is fed by the melting glacier in Mutnovsky volcano's crater (+1500–+1700 masl), is characterized by a range of  $-112\text{‰} < \delta D < -102\text{‰}$  and  $-15.7\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -14.2\text{‰}$  (average of 7 samples is  $-108\text{‰}$  and  $-14.9\text{‰}$ , respectively).

The Zhirovaia River and Falshivaya River drain volcanogenic basins at elevations of +500 to +700 masl in upstream conditions and are characterized by a range of  $-95\text{‰} < \delta D < -82\text{‰}$  and  $-13.4\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -11.6\text{‰}$  (Falshivaya, the average of 8 samples is  $-88.9\text{‰}$  and  $-12.5\text{‰}$ , respectively), and  $-93\text{‰} < \delta D < -88\text{‰}$  and  $-13.6\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -12.2\text{‰}$ , respectively (Zhirovaia, the average of 7 samples is  $-90.4\text{‰}$  and  $-13.0\text{‰}$ , respectively).

Thus, there is a significant contrast ( $\delta D \approx 20\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} \approx 2\text{‰}$ ) in the isotopic content of local groundwaters above the Mutnovsky production geothermal reservoirs and the Mutnovsky volcano glacier crater water.

Mutnovsky geothermal production wells were sampled at different times: prior to large-scale exploitation (1988–1998), at the beginning of exploitation (2003–2004), and more recently (2014–2016). In some cases, liquid phase (separated under atmospheric conditions) was used for the subsequent isotopic analysis, and in other cases, we sampled the liquid phase from separators at power plants (6–7 bars). In all cases, isotopic phase transition (steam loss) corrections were applied to water isotopic measurement data; these corrections take into account separation pressure and the enthalpy of production wells, and we used isotopic phase transition relationships and equilibrium constants at different saturation temperatures as presented in (Arnason, 1977). Hence, fluid water isotopic data of geothermal production wells are correlated here with production geothermal reservoir conditions.

Pre-exploitation water isotopic content (1988–1998) is characterized by a range of  $-125.1\text{‰} < \delta D < -110\text{‰}$  and  $-17.5\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -13.9\text{‰}$  (the average of 21 samples is  $-113.5\text{‰}$  and  $-14.8\text{‰}$ , respectively). These data correspond to the following sampled production wells: O29W, 4E, 049 N, 24, O1, 1, 048, and O14.

The early-stage exploitation water isotopic content (2003–2004) is characterized by a range of  $-115.7\text{‰} < \delta D < -108.1\text{‰}$  and  $-14.6\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -13.7\text{‰}$  (the average of 14 samples is  $-111.8\text{‰}$  and  $-14.1\text{‰}$ , respectively). These data correspond to the following sampled production wells: 5E, O37, O55, O48, O37, O29W, and 4E.

Recent stage exploitation water isotopic content (2014–2015) is characterized by a range of  $-112.7\text{‰} < \delta D < -104\text{‰}$  and  $-14.4\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -13.1\text{‰}$  (the average of 8 samples is  $-108.0\text{‰}$  and  $-14.4\text{‰}$ , respectively). These data correspond to the following groups of sampled production wells: O48 + Geo-1, 24 + A2 + Geo3 + O29W + O16 + GK1, O42 + O13 + O17 + O37 + Geo-2, and Geo-1 (in this case, the liquid phase from power plant separators was used) (Kiryukhin et al, 2014).

Thus, the production geothermal well isotopic ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) content data clearly indicate the following:

1. The melting glacier of the Mutnovsky volcano is the most likely water recharge area for production geothermal reservoirs in the Mutnovsky geothermal area.

2. Some trends of isotopic ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) ratios increasing during the 12-year exploitation period (5.5‰ in  $\delta D$ ) may have been caused by heavy local groundwater infiltration into the production geothermal reservoirs (which coincides with chloride dilution trend in production wells and adjacent hot springs) (Kiryukhin et al, 2018).

Its isotopic ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) composition varies in a range of  $-103\text{‰} < \delta D < -99.9\text{‰}$  and  $-15.7\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -13.4\text{‰}$  (Nizhne-Zhirovskey, the average of 9 samples is  $-101.5\text{‰}$  and  $-13.9\text{‰}$ , respectively), and  $-104.3\text{‰} < \delta D < -102\text{‰}$  and  $-14.3\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -13.8\text{‰}$  (Vilyuchinsky (well R27) the average of 5 samples is  $-103.3\text{‰}$  and  $-14\text{‰}$ , respectively). If phase corrections (steam losses at an initial enthalpy of 1260 kJ/kg and atmospheric pressure) are applied, these springs ( $-111.3\text{‰}$ ,  $-15.9\text{‰}$ ) match the isotopic ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) content of the Mutnovsky glacier melting water ( $-108\text{‰}$ ,  $-14.9\text{‰}$ ). On the other hand, steam jets in the Mutnovsky crater (Donnoye Pole) demonstrate isotopic ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) content ( $-80\text{‰}$ – $-6.7\text{‰}$ ), which aligns with the mixing line between the Mutnovsky glacier melting water and magmatic “andesite waters”. We should also indicate the

magmatic signs in gas composition sampled in the Mutnovsky production wells and thermal features, especially in the production reservoir parts adjacent to the Mutnovsky volcano zones. The  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{CO}_2$ ) values in wells 022, 031, 035, A4, and R27 and thermal features Medvejy and Verkhne-Mutnovsky vary in a range of  $-8.4\text{‰}$  to  $-5.6\text{‰}$ , which is indicative of the magmatic origin of the  $\text{CO}_2$  (Kiryukhin et al, 2017).

### Conclusions

1. The recharge from the Mutnovsky volcano crater glacier (+1500 to +1800 masl) through the Mutnovsky-3 funnel into the production geothermal reservoirs was confirmed by water isotopic ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ).

2. Some trends of isotopic ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) ratios increasing during the 12-year exploitation period (5.5‰ in  $\delta\text{D}$ ) may have been caused by heavy local groundwater infiltration into the production geothermal reservoirs (which coincides with chloride dilution trend in production wells and adjacent hot springs).

3. Production reservoir fluids are characterized by sodium-chloride-sulfate composition and low TDS from 630 to 1300 ppm. Major non-condensable gases (NCG) included  $\text{CO}_2$  - 73%,  $\text{H}_2\text{S}$  - 8% and  $\text{N}_2$  -19% in average. NCG concentrations varies from 1600 to 2400 ppm in steam dominated wells (O16 and 26), while less values in the range from 20 to 515 ppm in two-phase production wells were observed.

*This work was supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-05-00052 and RSF grant # 16-17-10008.*

### References

1. Arnason B., 1977. Hydrothermal systems in iceland traced by deuterium. Geothermics 1977, Vol. 5(1–4), pp. 140–144.
2. Kiryukhin A.V., 1993. High temperature fluid flows in the Mutnovsky hydrothermal system, Kamchatka. // Geothermics, 1993, Vol. 23 (# 1), pp. 49–64.
3. Kiryukhin, A.V., Takahashi M., Poliakov A.Yu., Lesnykh M.D., Bataeva O.P., 1999. Origin of water in the Mutnovsky geothermal field an oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) and hydrogen ( $\delta\text{D}$ ) study. // Journal of Volcanology and Seismology, 1999, Vol. 20, pp. 441–450.
4. Kiryukhin A.V., Asaulova N.P., Vereina O.B., Polyakov A.Yu., 2014. Estimating the Influence of Filtering during the Operation of the Pazhetka and Mutnovskii High\_Temperature Geothermal Fields, Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Seismology, 2014, Vol. 8, No. 3, pp. 156–167.
5. Kiryukhin A.V., Voronin P.O., Vorozheikina L.A., Kiryukhin P.A., 2017, Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs in Kamchatka, Russia // Geothermics, 2017. Vol. 70. pp. 47-61.
6. Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O., Kiryukhin P.A., 2018. Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia). // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2018, Vol. 356C., pp. 36-55.
7. A.B. Кирюхин, В.А. Корнеев, А.Ю. Поляков О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре, «Вулканонология и сейсмология», №6, 2006, с.3-11.
8. Кирюхин А.В., Лесных М.Д., Поляков А.Ю. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью. Вулканонология и сейсмология. 2002. № 1. С. 51
9. А.В.Кирюхин, В.Л. Леонов, И.Б. Слозцов, И.Ф. Делемень, М.Ю. Пузанков, А.Ю. Поляков и др. Моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального

месторождения в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт // Вулканология и Сейсмология, 2005, № 5, с.19-44.

## Modeling Studies of the Paratunsky geothermal field

**Nikita B. Zhuravlev**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia  
Zhuravlev-95@mail.ru*

The Paratunsky low temperature geothermal field has been operating since 1964 and is used for district heating, balneology and greenhouses. Nowadays, the current operation load of the Paratunsky geothermal field is 256 kg/s. The commissioning of the Paratunsky geothermal field using submersible pumps can fully solve the heat supply problem for the main consumers of the Kamchatka State (P-Kamchatskiy, Elizovo, Vilyuchinsk, ~250 000 inhabitants) and also reduce the cost of heating services for end users.

**Keywords:** geothermy, hydrogeology, Kamchatka, Paratunka, geothermal fields and reservoirs, wells, TOUGH2 modeling

## Моделирование исследований Паратунского геотермального месторождения

**Журавлев Н. Б.**

*Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, Пийна-9, Петропавловск-Камчатский 683006*

Паратунское геотермальное месторождение находится в эксплуатации с 1964 г., в течение последних 50 лет эксплуатации извлечено более 320 млн. т термальной воды с температурой 70-100 градусов, которая используется для теплоснабжения, бальнеологии и тепличного хозяйства. В настоящее время эксплуатационная нагрузка составляет 256 кг/с. Предполагается, что использование погружных насосов позволит нарастить суммарный водоотбор Паратунского геотермального месторождения до 1375 кг/с и обеспечить соседние города (Елизово, Виллючинск и Петропавловск-Камчатский) централизованным теплоснабжением.

**Ключевые слова:** геотермия, гидрогеология, Камчатка, Паратунка, геотермальное месторождение, скважины, моделирование

The Paratunsky low temperature is located in 40 kilometers southwest of Petropavlovsk-Kamchatskiy. This geothermal field has been operating since 1964 and is used for district heating, balneology and greenhouses. Nowadays, the current operation load of the Paratunsky geothermal field is 256 kg/s [2].

The commissioning of the Paratunsky geothermal field using submersible pumps can fully solve the heat supply problem for the main consumers of the Kamchatka State (P-Kamchatskiy, Elizovo, Vilyuchinsk, ~250 000 inhabitants) and also reduce the cost of heating services for end users.

The isotopic composition of Paratunsky thermal waters ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) indicates that the structure of the Vilyuchinsky volcano and highly elevated areas in the upstream of the Karymshina river provides water supply to the geothermal field. Heated water (up to 80-100° C) under the influence of local magmatic systems enters a productive geothermal reservoir [2].

Thermohydrodynamic model of the geothermal field was developed using the PetraSim 5.2 software. It is represented by a prism that partially coincides with the boundaries of the Paratunsky graben and extends to a depth of 3000 m (Fig. 1).

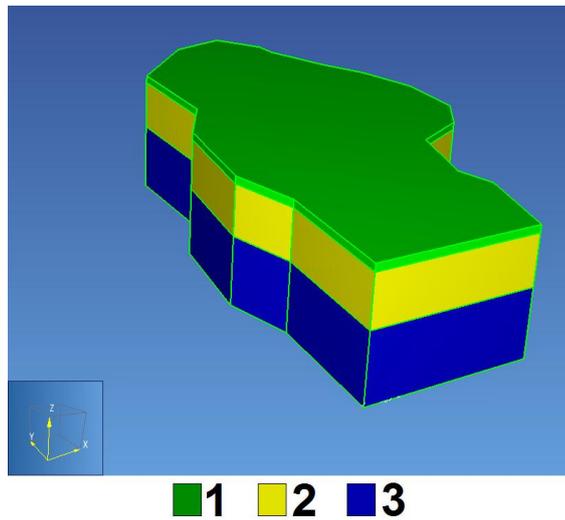


Figure1 – Model geometry. 1 — Upper «relative» caprock;  
2 — Productive geothermal reservoir; 3 — basement.

The upper model layer is divided into 3 horizontal sublayers of 45 m each, with the centers of the elements of  $z = -47.5$ ,  $z = -92.5$ ,  $z = -137.5$  m. (Fig. 2)

The permeable horizon of groundwater (GROWA domain) is defined in the sublayer  $z = -47.5$  m.

The separating aquiclude (CAPRK domain) is specified under the GROWA domain in sublayers  $z = -92.5$ ,  $z = -137.5$  m.

In the sublayer  $z = -137.5$  m abs, a low-permeable CAPR2 domain is defined along the periphery of the separating aquiclude.

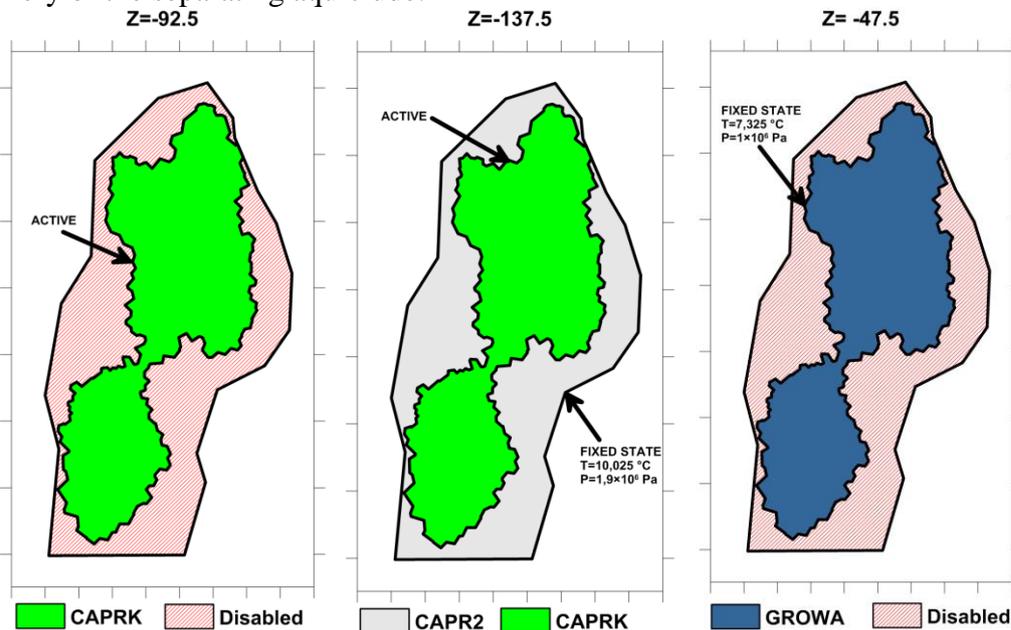


Figure2 – Upper model layer structure.

Middle layer of the model is divided into six sublayers of 200 m each (Fig. 3).

RESPR domain– geothermal reservoir, temperatures above  $60^{\circ}$  C, RESER – low-permeability rocks. The middle layer contains four productive sites: N – Severniy(Nothern); M –

Mikizhinskiy; NP – Nizhne-Paratunsky (*Lower-Paratunsky*); SR – Sredniy (*Middle*). The open eastern area (BUFFER domain, used as a fixed state in the model) of the productive geothermal reservoir is represented by the region where chloride water accumulates.

Z=-260...-1260

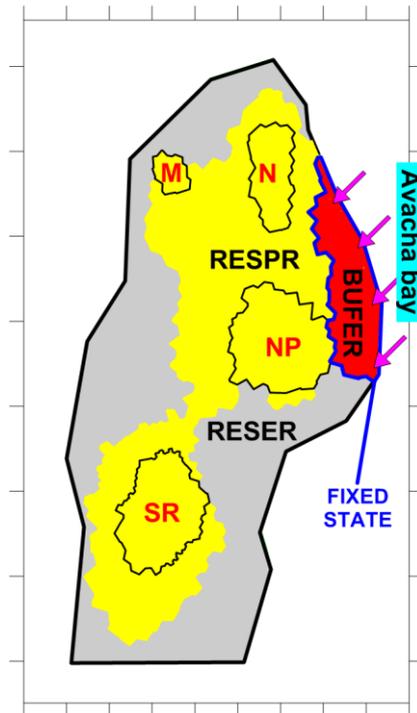


Figure3 – Middle model layer structure.

The lower model layer includes the basement of the Paratunsky geothermal field, it is defined in the depth interval from -1360 to -3000 m (Fig.4).

In the lower model layer, the BASEF domain corresponds to areas with high permeability and hot water upflow zones : N – Severniy(*Nothern*); M – Mikizhinskiy; NP – Nizhne-Paratunsky (*Lower-Paratunsky*);SR – Sredniy(*Middle*).

Z=-2180

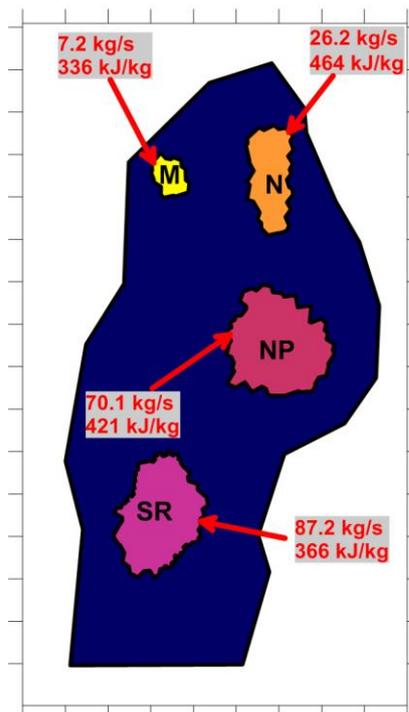


Figure4 – Lower model layer structure.

The BASE domain corresponds to low-permeable host rocks. In all elements of the lower layer of the model, a conductive heat flux of  $60 \text{ mW/m}^2$  is determined.

111 wells were assigned to the model. Exploitation flowrates were assigned in the model in the form of monthly average rates during history exploitation modeling.

For the simulation of pumping operation using submersible pumps, the model has been modified: 11 additional production wells were assigned to the model. All other wells were disabled, except for six observational: 9, 39, 52, 66, GK8, GK12.

Three variants of modeling with a total consumption of 825 kg/s, 1100 kg/s, 1375 kg/s were performed. The simulation period is 25 years.

The simulation results show that the maximum pressure drop in the reservoir will be 5 — 8 bar, the maximum temperature decrease 0,2 — 4°C.

Estimation of the economic efficiency of the Paratunsky geothermal field project was carried out based on the initial data presented using the «Investment analysis 2.9» software.

To initiate the project, a loan of 9.8 billion rubles is needed, the loan repayment rate is assumed to be 18%, repayment of the loan begins with the 3rd year of operation, the discount rate is assumed to be equal to the interest rate on the attracted credit resources of 18%, inflation is set at 8.4%.

The payback period of the project, taking into account the discounting, will be 4.8 years, the internal rate of return is 29.3%, the net discounted income is 6.95 billion rubles.

### **Conclusions**

The Paratunsky low temperature geothermal field is used for district heating, balneology and greenhouses with the current operation load of 256 kg/s. The structure of the Vilyuchinsky volcano and highly elevated areas in the upstream of the Karymshina river provides water supply to the geothermal field.

The thermohydrodynamic model of the geothermal field was developed. It is represented by a prism that partially coincides with the boundaries of the Paratunsky graben and extends to a depth of 3000 m. The vertical structure of the model is represented by the caprock, the productive reservoir and the basement. The heat carrier inflows, discharge conditions and wells with flow rates during the operation period are determined at the model.

The model was used to forecast three scenarios for the field operation with a total water intake of eleven production wells of 825, 1100 and 1375 kg/s for a period of 25 years. The results of the predictive modeling show that the maximum reduction in the pressure in the reservoir does not exceed 8 bar, the maximum temperature decrease is less than 4°C.

Analysis of the economic efficiency of the exploitation of the Paratunsky geothermal field with submersible pumps shows that the payback period, taking into account discounting and inflation, will be 4.8 years, net discount income 6.95 billion rubles over 10 years of operation. The production of thermal energy for remote consumers (Petropavlovsk-Kamchatsky, Elizovo and Vilyuchinsk) will amount to 1 630 000 Gcal per year (216 MW of heat), which provides heat consumption in the district heating systems of Petropavlovsk-Kamchatsky agglomeration.

*This work was supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-05-00052.*

### **References**

1. Kiryukhin A.V., Kiryukhin V.A., Manukhin Y.F. Hydrogeology of volcanogenes. Saint-Petersburg: Nauka, 2010. 360 p. (in Russian)
2. A.V. Kiryukhin, L.A. Vorozheikina, P.O. Voronin, P.A. Kiryukhin. Thermal and permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs in Kamchatka, Russia // Geothermics. 2017. p. 47-61.
3. Kiryukhin A. V. Modeling of Exploitation Geothermal Reservoirs. Vladivostok: Dalnauka, 2002. 216 p. (in Russian)

## **Conceptual modeling of the geothermal waters in the continental rift zones of the Menderes Massif, western Anatolia, Turkey**

**Nevzat Özgür**

*Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, 32260 Çünür, Isparta  
nevzatozgur@sdu.edu.tr*

In western Anatolia, Turkey, the geothermal waters of Kızıldere, Bayındır, and Salihli represent excellent examples of geothermal waters. The meteoric waters in the drainage area percolate at fault zones and permeable clastic sediments into the reaction zone of the roof area of a magma chamber situated at a probable depth of up to 5 km. Here the meteoric fluids are heated by the cooling magmatic melt and ascend to the surface due to their lower density caused by convection cells. The volatile components of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, HF, and He that are released out of the magma reach the geothermal water reservoir where equilibrium between altered rocks, gas components, and fluids occurs. Finally, the geothermal waters ascend along tectonic zones of weakness at the continental rift zones of the Menderes Massif, forming hot springs, gases, and fumaroles. These fluids are characterized by high to medium CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, and NaCl contents.

**Keywords:** Turkey, western Anatolia, Menderes Massif, continental rift zones, geothermal waters, conceptual modelling

## **Концептуальное моделирование геотермальных вод в континентальных рифтовых зонах Мендереса, западная Анатолия, Турция**

**Невзар Озгур**

*Университет Сулеймана Демиреля, инженерный факультет, факультет геологической инженерии, 32260 Çünür, Isparta*

В западной Анатолии, Турция, геотермальные воды Кызылдер, Байиндыр и Салихли представляют собой отличные примеры геотермальных вод. Метеорные воды в дренажной зоне просачиваются в зонах разломов и проницаемых обломочных отложениях в реакционную зону магматической камеры, расположенную на вероятной глубине до 5 км. Здесь метеорные жидкости нагреваются охлаждающим магматическим расплавом и поднимаются на поверхность из-за их меньшей плотности, вызванной конвекционными ячейками. Летучие компоненты CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, HF и He, которые выделяются из магмы, достигают геотермального водохранилища, где происходит равновесие между измененными породами, газовыми компонентами и жидкостями. Наконец, геотермальные воды поднимаются вдоль тектонических зон слабости в континентальных рифтовых зонах массива Мендереса, образуя горячие источники, газы и фумаролы. Эти жидкости характеризуются высоким содержанием CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и NaCl.

**Ключевые слова:** Турция, западная Анатолия, Мендересский массив, континентальные рифтовые зоны, геотермальные воды, концептуальное моделирование

### **Introduction**

In the Menderes Massif within the western Anatolia, the geothermal fields of Kızıldere, Bayındır and Kurşunlu located in the rift zones of the Büyük Menderes, the Küçük Menderes and the Gediz have been selected for geochemical investigations. The aim of this paper is to report on the hydrogeochemical and isotope geochemical features of the geothermal waters in the rift zones in combination with the origin and evolution of these waters and to design a hydrogeological model of the geothermal waters.

### **Geologic setting**

The geothermal fields of Kızıldere, Bayındır and Kurşunlu are located in the rift zones of the Büyük Menderes, the Küçük Menderes and the Gediz within the Menderes Massif (Figure 1). This massif is one of the oldest basements in Turkey and consists of (i) gneiss-core surrounded by a

schist and marble envelope and (ii) an intensely deformed volcano-sedimentary sequence with incipient HP/LT metamorphism. The geothermal field of Kızıldere consists of Paleozoic metamorphic rocks, such as gneisses, mica schists, quartzites and marbles of the İğdecik formation), and Late Miocene to Quaternary sediments of the the Kızılburun, Sazak, Kolonkaya and Tosunlar stratigraphic formations (Özgür, 1998). The geothermal field of Bayındır is located in the northern part of the rift zone of the Küçük Menderes. Quartzites, with a thickness of around 50-100 m, form the oldest rocks, with a well-developed fracture network, which is crucial for the circulation of the geothermal waters. The mica schists are impermeable and play an important role for the formation of a geothermal water reservoir in quartzites and marbles being an impermeable cap rocks and basement. The marbles occur as alternating layers in mica schists and have thicknesses from 10 to 200 m. These rocks show a good developed fracture system that is of major importance for the formation of geothermal waters. The geothermal fields of Kurşunlu and Çamurlu, located at Salihli in the rift zone of the Gediz, are composed of Permocarbiniferous metamorphic rocks, Miocene to Pliocene sedimentary rocks and Quaternary alluvium.

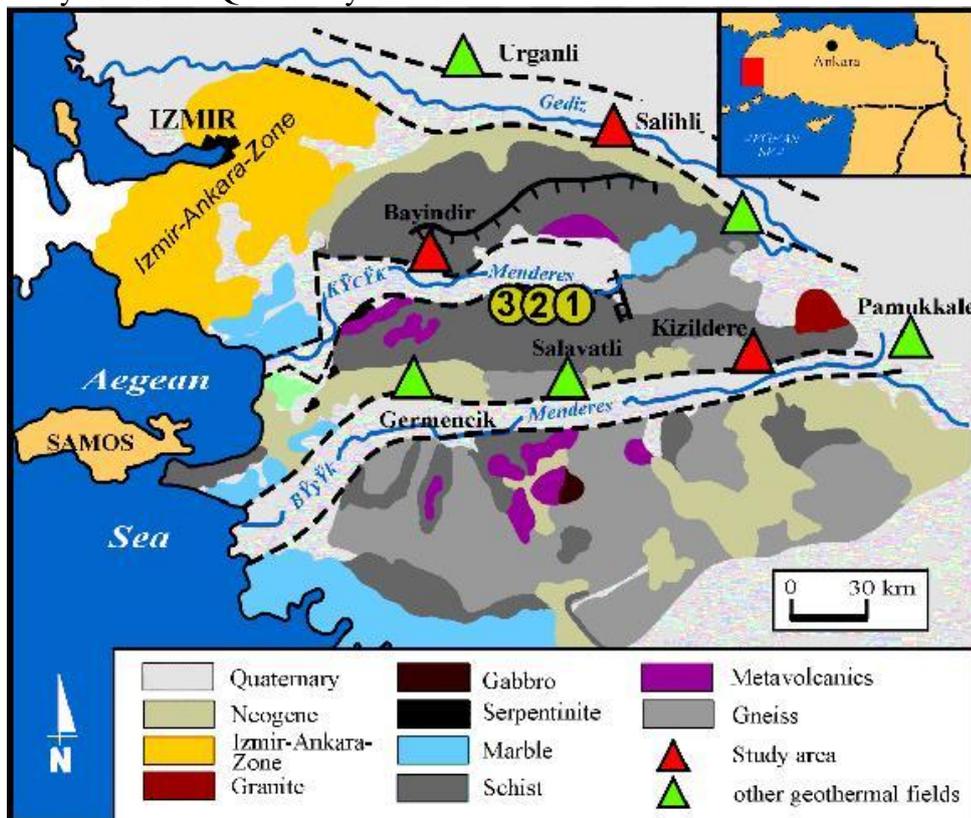


Figure 1 – Geotectonic development of the Menderes Massif and continental rift zones. 1: Hg deposit of Halıköy, 2: Sb deposit of Emirli, 3: Au deposit of Küre (Özgür, 1998).

### Hydrogeological and hydrogeochemical features

The drainage area of the geothermal field Kızıldere occupies an area of around 150 km<sup>2</sup>. For geothermal waters discharged in channels, a rate of around 8 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/y was measured. The river of the Büyük Menderes begins as a karst spring at Dinar near Isparta and the discharge rate of the river ranges from around 15-20 m<sup>3</sup>/s in winter to 2 m<sup>3</sup>/s in summer. The geothermal waters of Kızıldere originate from two different reservoirs: the Sazak formation at depths of about 400 m and the İğdecik formation at depths from 1000 to 1242 m. The second reservoir forms the main resource for the exploitation of geothermal waters in Kızıldere and is formed by Paleozoic schists, quartzites and marbles. Reservoir temperatures lie in the range of 148 to 198 °C in the Sazak formation and in the range of 200 to 212 °C in the İğdecik formation. The gneisses occurring at greater depths form a third reservoir with temperatures from 250 to 260 °C. A lowering of the pressure in the reservoir is observed due to extreme production, being dependant on the lack of a reinjection well. Moreover, there is evidence for a shift of steam outlets downward the catchment and a distinct lateral movement of the steam outlets to the catchment area of the geothermal power plant has taken place.

The lowering of the steam outlet level of about 100 to 150 m is due to a decrease of pressure of about 15 bar. The surface temperatures are 96-100 °C in Kızıldere and 37- 88 °C in environs. Groundwater flow in the drainage area of the geothermal field in Bayındır is southwards on the northern part of the rift zone of the Küçük Menderes in Bozdag Horst, where the geothermal water reservoir is supplied by meteoric groundwater; thereby, the Ilıca creek plays an important role.

During the present study, 20 geothermal springs, 12 drill holes and 16 springs were collected in different seasons from 1992 up to now. Additionally, we have collected about two hundred rock samples (Giese, 1997; Özgür, 1998). Generally, the geothermal waters of Kızıldere, Bayındır and Salihli can be classified as Na-(SO<sub>4</sub>)-HCO<sub>3</sub> type. The geothermal waters of Kızıldere, Tekkehamam and Babacık can be classified as Na-(SO<sub>4</sub>)-HCO<sub>3</sub> type, whereas the geothermal waters of Pamukkale and Karahayıt show Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> water type (Özgür, 1998). The origin of Na<sup>+</sup> in the geothermal waters is linked to metamorphic rocks in the substratum, while carbonate rocks in the reservoir explain the origin for Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>. The Na/K geothermometer gives a reservoir temperature of 220-248 °C in Kızıldere and 211-313 °C in environs. More specifically, the geothermal waters of Kızıldere and environs are distinguished by (i) an enrichment of F<sup>-</sup>, Si<sup>4+</sup> and B<sup>3+</sup>, (ii) an enhancement of trace metals such as As<sup>3+</sup> and Sb<sup>3+</sup> and (iii) a depletion of base metals in combination with Fe<sup>2+</sup> and Mn<sup>2+</sup>. According to such trends, the volatile components CO<sub>2</sub>, HS<sup>-</sup> and NH<sub>3</sub> indicate a magmatic input; which could be conditionally confirmed by isotope analyses like δ<sup>11</sup>B. The geothermal waters in Kızıldere and environs have fluorine contents up to 35 mg/l. On the one hand, these high contents can indicate a magmatic origin of volatile components but on the other hand, the increasing value of fluorine in geothermal waters depends upon Ca<sup>2+</sup> contents, because there must be a corresponding Ca<sup>2+</sup> donor in the environment in order to release a corresponding amount of F<sup>-</sup>. Otherwise, fluorine ions remain released, and the fluid is enriched with F<sup>-</sup>. Depending upon temperature, fluorine and boron show a close correlation in geothermal waters of Kızıldere and environs (Özgür, 1998), such positive correlation is probably based on (i) interconnection of thermodynamic control processes and (ii) substitution of both elements in boron-bearing minerals. The geothermal waters of Kızıldere represent average Si<sup>4+</sup> contents of 115 mg/l, solubility equilibrium of Si<sup>4+</sup> depends upon the modification of amorphous silica, which allows high Si<sup>4+</sup> concentrations. As the geothermal waste waters of the geothermal power plant of Kızıldere should be reinjected in order to supply the geothermal water reservoir constantly and remove agricultural danger for citrus fruits in the rift zone of the Büyük Menderes in view of environmental aspects, the precipitation of Si<sup>4+</sup> as precipitates represents a potential danger for the reinjection system as documented by thermodynamic and kinetic results (Giese, 1997). Thereby, Si<sup>4+</sup> precipitates will occur in the reinjection well depending on time, with regard to ion strength of pH values and temperature (below 100 °C). The geothermal waters in Kızıldere have As values up to 1.08 mg/l and Sb values up to 0.21 mg/l. Depending upon temperature, these elements show a close correlation in geothermal waters which is the case in the rocks as well. The geothermal waters of Bayındır are distinguished by a temperature of 46°C, a pH value of 6.9, an Eh value of -94 mV, an average EC value of 1015 µS/cm and an average TDS value of 1399 mg/l. They differ from the surface waters and groundwaters in respect to hydrogeochemical composition and standardization distinctly. In the geothermal fields of Salihli, there are five geothermal springs of Kurşunlu and Çamurlu and three production wells. Four of the geothermal springs are located in Kurşunlu with temperatures from 96 to 36 °C. One of them is situated in Çamurlu. The geothermal waters of Salihli are of Na-K-HCO<sub>3</sub> type, and Ca-HCO<sub>3</sub> type. In comparison to Kızıldere, the low contents of F<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, As<sup>3+</sup> and Sb<sup>3+</sup> and the high contents Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup> in the geothermal waters of Salihli are distinctly conspicuous. The low contents of F<sup>-</sup> can be correlated with increasing Ca<sup>2+</sup>, because both elements in fluids can be precipitated as CaF<sub>2</sub>.

### **Isotope geochemistry**

The geothermal waters of Kızıldere, Bayındır and Salihli can be classified as meteoric water due to the isotope ratio of δ<sup>18</sup>O and δ<sup>2</sup>H (Özgür, 1998). The <sup>3</sup>H contents in geothermal waters are attributed to atmospheric and anthropogenic effects. They indicate that the geothermal waters of Bayındır and Salihli can be considered as mixing water. The geothermal waters of Kızıldere show

scarcely any mixing of young groundwaters, because  $^3\text{H}$  contents are below the detection limit. The  $^3\text{H}$  isotopes in geothermal waters of Salihli show the existence of water mixing; therefore, the components of anions and cations are diluted in comparison to Kızıldere and occur in present concentrations. The ratios of  $\delta^{13}\text{C}$  in groundwaters, mixed waters and geothermal waters reveal that the origin of  $\text{CO}_2$  can be linked to magmatic activity by sub-volcanism in basement rocks and to reactions with carbonate rocks.  $\text{CO}_2$  production in connection with carbonate rocks in the reservoir dilutes  $^{14}\text{C}$  in geothermal waters, by which the age determination with  $^{14}\text{C}$  is almost impossible.

### Hydrogeological modelling of the geothermal waters in the Menderes Massif

In active geothermal fields of Kızıldere, Bayındır and Salihli, groundwater flow takes place in drainage areas from the upstream part of the watershed in horsts to lower places located around rift zones where the groundwaters ultimately reach the watercourse. The meteoric waters in the drainage area percolate at fault zones and through permeable clastic sediments into the reaction zone of a magma chamber situated at a probable depth of up to 5 km (Figure 2). Here, meteoric fluids are heated by the cooling magmatic melt and ascend to the surface due to their lower density, caused by convection cells. The volatile components of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HB}^-$ ,  $\text{HF}^-$ , and  $\text{He}$  out of the magma reach the geothermal water reservoir where equilibrium between altered rocks, gas components, and fluids occurs.

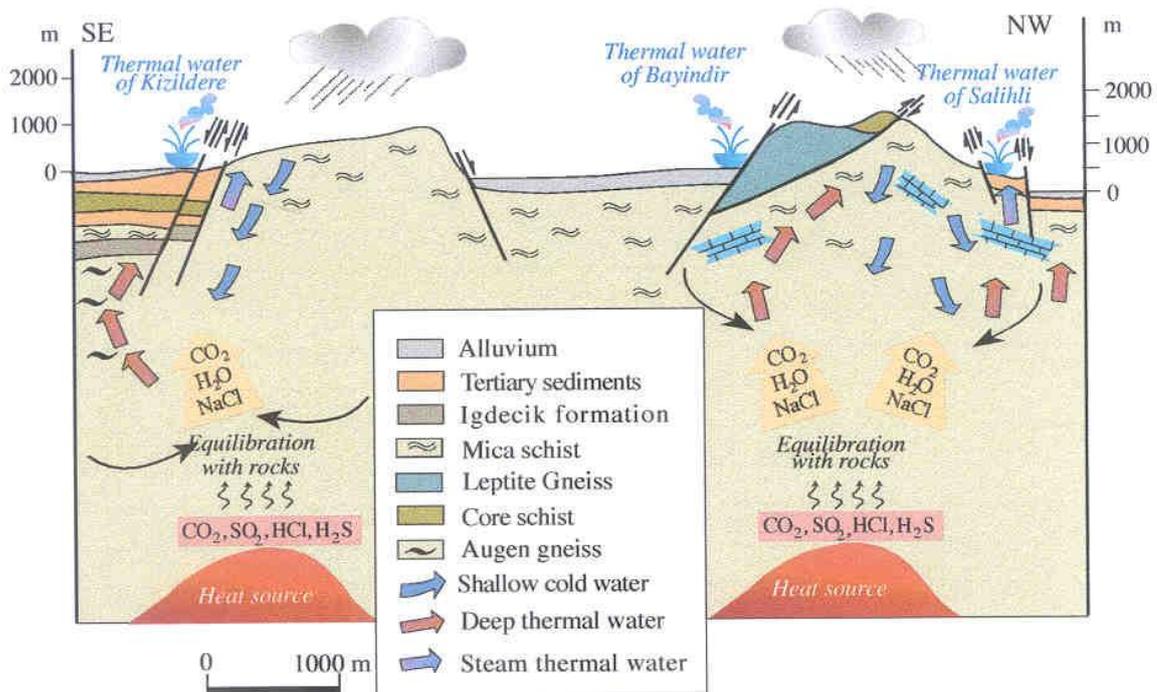


Figure 2 – Hydrogeological conceptual modelling of geothermal waters in the continental rift zones of the Menderes Massif (Özgür, 1998).

Thus, the geothermal waters ascend in the tectonic zones of weakness at the continental rift zones of the Menderes Massif in the form of hot springs, gases, and steams. These fluids are characterized by high to medium  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{NaCl}$  contents. It is very important that the fluids indicate a reduced pH-neutral environment after equilibrium adjustment with hard rocks in the reaction zone, namely in the roof area of magma chamber. In superficial areas, i.e. beneath a depth of 550m in Kızıldere with a pressure of 50 to 100 bar, a temperature of 200 to 220 °C and a pH value of lesser than 5.0, fluids come to boiling by decrease of pressure; thereby,  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  rich steams are split off from geothermal waters, which can lead to formation of sulfate-rich waters after condensation and surface oxidation (Özgür, 1998).

## References

1. *Giese, L.*, 1997, Geotechnische und umweltgeologische Aspekte bei der Förderung und Reinjektion von Thermalfluiden zur Nutzung geothermischer Energie am Beispiel des Geothermalfeldes Kizildere und des Umfeldes, W-Anatolien/Türkei. Ph.D. Thesis, Freie Universität Berlin, 201 p.
2. *Özgür, N.*, 1998, Aktive und fossile Geothermalsysteme in den kontinentalen Riftzonen des Menderes-Massives, W-Anatolien/Türkei. Habilitationsschrift, Freie Universität Berlin, 171 p.

## SECTION V. MECHANISM OF GEYSER FUNCTIONING AND CYCLICITY IN HYDROTHERMAL SYSTEMS

### РАЗДЕЛ V. МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ И ЦИКЛИЧНОСТЬ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК556.3

#### Modeling and Observations of the Geysers

**Tatyana V. Rychkova**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia  
tvr62@mail.ru*

The conditions for the formation of the hydrothermal system of the Valley of Geysers, in particular the area of water supply and the source of heat, are described, and the results of modeling the natural state of the hydrothermal system are reflected. The results of monitoring by the geysers Velikan and Bolshoy for the period after the catastrophic landslide on June 3, 2007, and up to the mudflow on January 3, 2014 are given. Time-varying thermohydrodynamic conditions and conditions for CO<sub>2</sub> supply in the Giant geyser channel were discovered during the entire cyclic process. It is established that for the period from 1941 to 2017. There were significant changes in the interval between eruptions, power of eruptions, changes in the content of chlorine and other chemical elements in the main geysers of Velikan and Bolshoi. However, the overall depth of discharge remains relatively stable, and therefore all changes are explained by the redistribution of heat flux due to the Giant landslide on June 3, 2007, the mud flow on January 3, 2014, and other events that led to erosion relative to the impermeable layer and water injection into a geothermal reservoir.

**Keywords:** Geysers Valley, hydrothermal system, modeling, Giant Landslide, Velikan and Bolshoy Geysers

#### Моделирование и исследование гейзеров

**Т. В. Рычкова**

*Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, Пуйна-9, Петропавловск-Камчатский 683006*

Описаны условия формирования гидротермальной системы Долины Гейзеров, в частности область водного питания и источник тепла. Отражены результаты моделирования естественного состояния гидротермальной системы [Кириухин и др., 2009; Kiryukhin et al., 2010; Kiryukhin, Rychkova, 2010; Kiryukhin et al., 2012]. Приведены результаты мониторинга по гейзерам Великан и Большой за период после катастрофического оползня 3.06.2007 и до селевого потока 3.01.2014 г. Обнаружены изменяющиеся во времени термогидродинамические условия и условия поступления CO<sub>2</sub> в канале гейзера Великан в течение всего циклического процесса. Установлено, что за период с 1941 по 2017 гг. по основным гейзерам Великану и Большому произошли значительные изменения интервала между извержениями, мощности извержений, изменению содержания хлора и других химических элементов. Тем не менее, общая глубинная разгрузка остается относительно стабильной, и поэтому все изменения объясняются перераспределением теплового потока вследствие оползня 3 июня 2007 г., селевого потока 3 января 2014 г. и других событий, приведших к эрозии относительно водоупорного слоя и инъекции воды в геотермальный резервуар.

**Ключевые слова:** Долина Гейзеров, гидротермальная система, моделирование, катастрофический обвал-оползень, гейзеры Великан и Большой

Формирование гидротермальной системы Долины Гейзеров происходит в пределах двух проницаемых зон разломов расположенных над предполагаемым частично расплавленным магматическим телом с областью водного питания метеорными водами вдоль обнажений риолит-дацитовых экструзий. Быстрая эрозия долины приводит к

увеличению разгрузки гидротерм, циклическому режиму работы гейзеров и оползневым явлениям (рис. 1).

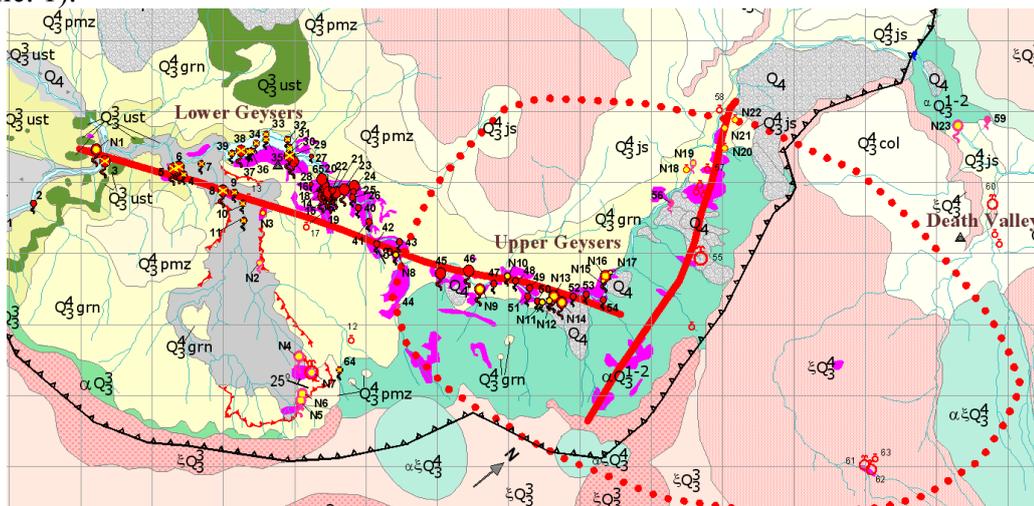


Рисунок 1 – Геологическая схема Долины Гейзеров (литология по Леонову В.Л., 2008) с дополнением гидрогеологической и гидротермальной характеристиками. Геологические подразделения показаны индексами. Серый заполненный контур на левой стороне карты – контуры оползня 3 июня 2007 г.; точечная линия – предполагаемая проекция частично расплавленного магматического очага; толстые красные линии – теплопроводящие зоны; сиреновой закрашкой показаны температурные аномалии, обнаруженные в результате вертолетной ИК съемки 5.08.2010 г.; символы с числами - горячие источники, гейзеры и фумаролы (термопроявления, обнаруженные после оползня показаны с желтым заполнением символов); черная зубчатая линия – граница кальдеры. Плоскость скольжения оползня соответствует подошве пемзовых туфов пачки Гейзерная ( $Q_3^4 grn$ ). Сетка карты - 500 м.

Основная термовыводящая зона восходящего потока вытянута в северо-восточном направлении и заложена в пределах верхнеплейстоценовых отложений, слагающих докальдерный комплекс, представленных озерными туфами и осадочными образованиями, осложненными комплексом даек ( $Q_3^3 ust$ ). Эта зона трассируется кипящими источниками и гейзерами с суммарной разгрузкой 260-300 кг/с. Другая значимая термовыводящая зона вытянута в северном-северо-западном направлении (параллельно краю кальдеры) и прослеживается фумаролами и термальными полями на Верхне-Гейзерном поле. Указанные выше две проницаемые термовыводящие зоны - основные элементы теплопереноса в гидротермальной системе Долины Гейзеров.

Роль водоупора в гидротермальном резервуаре выполняют озерно-кальдерные отложения Гейзерной пачки ( $Q_3^4 grn$ ), залегающие с углом падения  $8-25^\circ$  в северо-западном направлении в сторону бассейна р. Гейзерная. Когда восходящий термальный флюид достигает подошвы этого наклонного водоупорного слоя, то происходит его разделение на паровую и жидкую фазу. Пар движется вверх (по восстанию подошвы водоупора) в северо-восточном направлении, жидкая фаза – вниз (по падению подошвы водоупора) в направлении долины р. Гейзерная, где происходит разгрузка гейзеров и горячих источников.

Результаты изотопного анализа воды ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) из горячих источников и гейзеров говорят о том, что область водного питания совпадает с границей кальдеры, и в пределах липарит-дацитовых экструзий. Предполагается, что источником тепла для гидротермальной системы Долины Гейзеров является частично расплавленное магматическое тело под Верхне-Гейзерным полем.

Моделирование естественного состояния гидротермальной системы показало, что формирование парового резервуара под наклонно залегающим водоупором, имеет потенциал гидротермального взрыва (рис. 2).

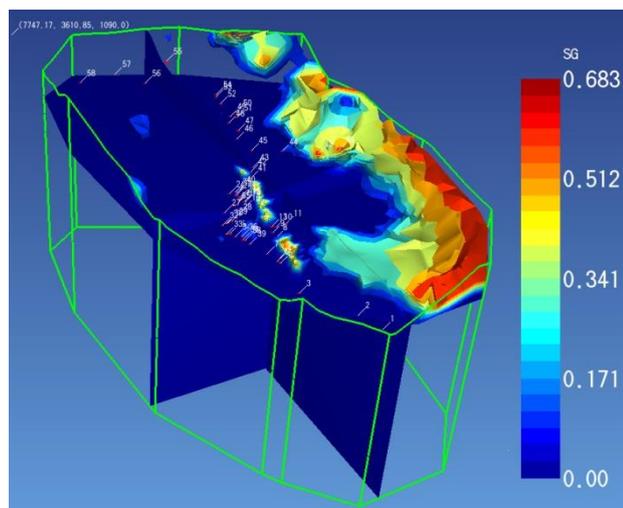


Рисунок 2 – Модельное распределение паронасыщения в гидротермальной системе Долины Гейзеров спустя 100000 лет после начала действия притока глубинного теплоносителя

Результаты моделирования естественного состояния также показали, что катастрофический оползень 2007 г. - это очередной этап процесса соскальзывания гидротермально-измененных пород верхнего водоупорного слоя в бассейн р. Гейзерная.

Возможными триггерами катастрофического оползня являются уклон плоскости скольжения в сторону бассейна р. Гейзерная, повышение давления в магматической питающей системе, насыщение висячего блока водой во время весеннего паводка, гидротермальные изменения на плоскости скольжения и гидротермальный взрыв пара.

Мониторинг за гейзерами Великан и Большой в период после катастрофического оползня 3.06.2007 г. и до селевого потока 3.01.2014 г. показал, что интервал между извержениями гейзера Большого уменьшился с 108 до 63 минут, а интервал между извержениями гейзера Великана уменьшился с 379 минут до 335 минут (рис. 3 и 4).

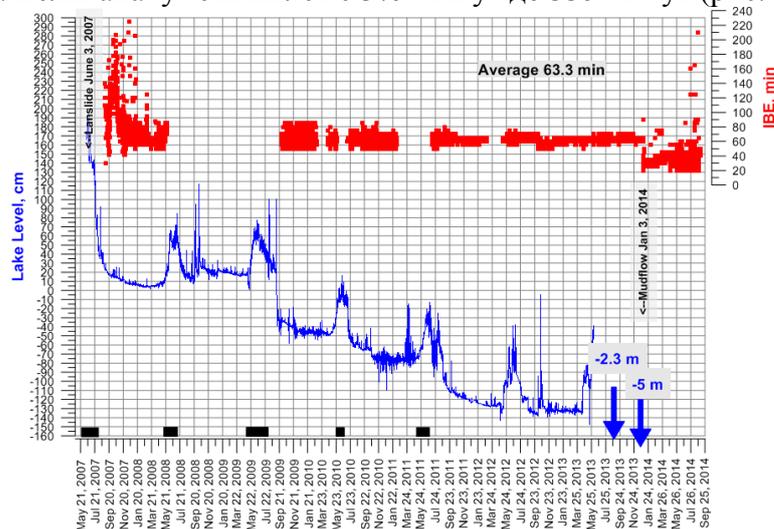


Рисунок 3 – Интервал между извержениями (мин) гейзера Большого (верхний график) и относительный уровень (см) озера Подпрудного (нижний график и вертикальные стрелки). Черные квадраты вдоль оси времени соответствуют временным интервалам, когда извержения не происходили. Погрешность в расчете интервала между извержениями 5 мин.

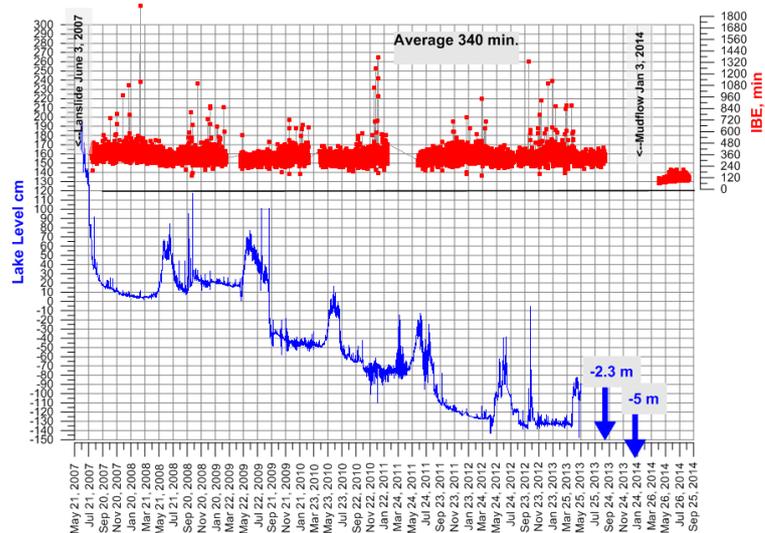


Рисунок 4 – Интервал между извержениями (мин) гейзера Великан (верхний график) и относительный уровень (см) озера Подпрудного (нижний график и вертикальные стрелки).

Погрешность в определении интервала между извержениями 5 мин.

Установлено, что аномальные увеличения периода извержений гейзера Великан свыше 600 мин и уменьшения периода ниже 200 мин происходят только в зимнее время, т.е. имеют выраженный сезонный характер. В среднем, увеличение периода извержений в зимний период по сравнению с летним периодом составляет около 41 мин.

Установлено, что в газовой составляющей гидротермального резервуара, питающего гейзер Великан, преобладает углекислый газ (CO<sub>2</sub>, 61,5%) и азот (N<sub>2</sub>, 32,1%), а также в значительном количестве метан (CH<sub>4</sub>, 5,8%) и водород (H<sub>2</sub>, 0,45%).

Также наблюдается разбавление хлора как глубинной компоненты в воде гейзеров Большого (-23%) и Великана (-12%).

Установлено, что среднее значение разгрузки глубинной компоненты в гидротермальной системе Долины Гейзеров, определенное с помощью хлоридного метода на выходе из Подпрудного озера, составляет 215 кг/с. Эта величина значительно уменьшается (30%) во время весенних паводков в мае-июне, вероятнее всего из-за закупорки каналов при повышении уровня грунтовых вод [Кирюхин и др., 2015] (рис. 5).

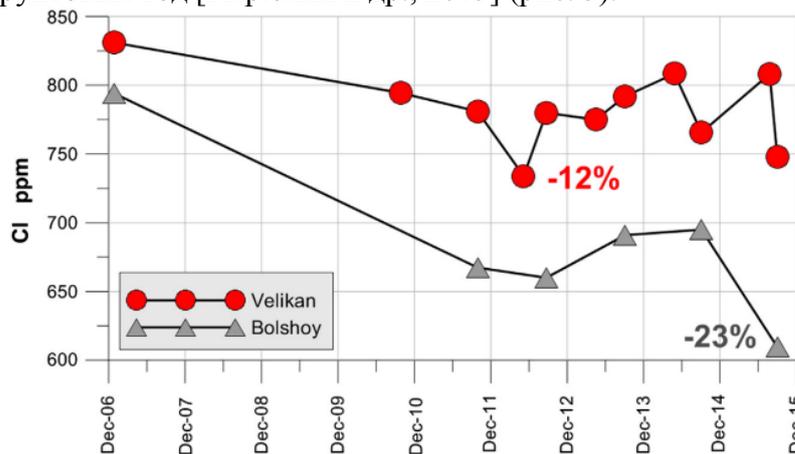


Рисунок 5 – Изменения концентрации хлор иона в гейзерах Великан и Большой. Данные до 2007 г. приводятся по Сугробову В.М. [Сугробов и др., 2009].

Созданная TOUGH2 модель циклической работы гейзера Великана используется для описания изменяющихся во времени термогидродинамических условий и условий CO<sub>2</sub> в канале гейзера в течение всего циклического процесса. Результаты моделирования показали, что двухфазные условия (необходимые для извержения гейзера), воспроизводятся в том случае, когда в качестве флюида рассматривается двухкомпонентный флюид (H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>). В случае с однокомпонентным флюидом (H<sub>2</sub>O) достигаются только температуры воды,

фактически существующие в канале гейзера, но кипения, необходимого для извержения, не происходит.

Разработана также двухмерная TOUGH2 EOS-1+ трассер модель неглубокозалегающего продуктивного гейзерного резервуара. Модель использовалась для описания изменений термогидродинамического состояния и концентрации хлора в зонах наиболее активной разгрузки как в устойчивом состоянии гидротермальной системы, так и в состоянии инжекции из Подпрудного озера и из других источников холодной воды (после 3.06.2007). Увеличение модельной разгрузки гейзеров (как результат моделирования), вызванное увеличением пластового давления из-за инжекции холодной воды, вполне соответствует наблюдаемому уменьшению интервала между извержениями гейзеров Большого (~ 58%) и Великана (~ 9%). Результаты моделирования не показали наблюдаемое разбавление хлора в гейзере Большом, что связано с наличием прямого притока холодной воды в канал Гейзера Большого. Результаты моделирования также не показали наблюдаемое разбавление хлора в гейзере Великане вследствие инжекции из Подпрудного озера. Это осталось задачей дальнейших исследований [Кирюхин, Рычкова, 2011; Kiryukhin, Rychkova, 2012; Кирюхин, Рычкова, 2013; Кирюхин и др., 2015; Kiryukhin, 2016].

За период мониторинга в Долине Гейзеров с 1941 по 2017 гг. установлены значительные изменения интервала между извержениями и мощность извержений, изменение содержания хлора и других химических элементов, извержение при заниженных температурах. Тем не менее, общая глубинная разгрузка остается относительно стабильной, и поэтому все изменения объясняются перераспределением теплового потока из-за Гигантского оползня 3 июня 2007 г., селевого потока 3 января 2014 г. и других событий, приведших к эрозии относительно водоупорного слоя и инжекции воды в геотермальный резервуар [Kiryukhin et al., 2018]. TOUGHREACT V.3 химическое моделирование гейзера Великан подтверждает 20 % -ное разбавление глубинного компонента CO<sub>2</sub> после 2014 года. Замеренные температуры в каналах гейзеров Великан и Большой показали температуру в канале в стадии извержения ниже температуры кипения при соответствующем гидростатическом давлении, что означает, что циклический поток магматического CO<sub>2</sub> инициирует достижение температуры кипения в каналах и инициирует извержения гейзеров Большого и Великана, создавая условия газ-лифта, а парциальное давление CO<sub>2</sub> определяет мощность извержений.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 18-05-00052.*

### **Список литературы**

1. Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дрознин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л. Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров. // Научно-популярный очерк, путеводитель / Петропавловск-Камчатский, изд-во «Камчатпресс», 2009, 108 с.
2. Кирюхин А.В., Рычкова Т.В., Дрознин В.А., Черных Е.В. Исследование характеристик гидротермальной системы Долины Гейзеров (Камчатка) после катастрофического обвала-оползня 3 июня 2007 г. // Сборник докладов ИВиС ДВО РАН на конференции, посвященной Дню Вулканолога 30 марта 2009 г., 8 стр.
3. Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Droznin V.A., Chernykh E.V., Puzankov M.Y., Vergasova L.P. Geysers Valley Hydrothermal System (Kamchatka): Recent Changes Related to Landslide of June 3, 2007 // Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, 6 p.
4. A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // Proc. 13-th Int. Conf. Water-Rock Interaction, Guanajuato, Mexico, 16-20 Aug. 2010, p.917-920. ISBN: 978-0-415-60426-0 (Hbk+CD-rom) ISBN: 978-0-203-83404-6 (eBook).

5. Кирюхин А.В., Рычкова Т.В. Условия формирования и состояние гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. №3, 2011, С. 238-253.
6. Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide // Applied Geochemistry journal. 2012. № 27. P. 1753-1766.
7. V. Kiryukhin and T. V. Rychkova. Functioning of Natural and Natural–Engineering Systems Formation Conditions and Natural State of the Hydrothermal System in the Valley of Geysers (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) // ISSN 0097\_8078, Water Resources, 2012, Vol. 39, No. 7, pp. 719–733.
8. Кирюхин А.В., Рычкова Т.В. Исследования гидрогеологического режима гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 // Сб.ІV научно-технической конференции "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России" 30 сентября - 4 октября 2013 г., Петропавловск-Камчатский, стр. 53-54.
9. Кирюхин А. В., Рычкова Т. В., Дубинина О. Е. Анализ гидрогеологического режима гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 03.06.2007 // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 3-20.
10. Alexey Kiryukhin. Modeling and observations of geysers activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2016. P. 129–147.
11. Kiryukhin A., Sugrobov V., and Sonnenthal E.. Geysers Valley CO2 Cycling Geological Engine (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2018. ID 1963618, 16 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/1963618>.

## Phase composition of the Velikan geyser deposits (Valley of Geysers, Kamchatka)

Anastasiya V. Sergeeva

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia  
valraf2009@yandex.ru*

The phase (mineral) composition of the sediment sample of the Giant geyser located in the Valley of Geysers (Kamchatka) was investigated. A sample taken at the mouth of the geyser was examined by X-ray diffractometry (Shimadzu XRD 7000) and infrared spectroscopy (IR Affinity).

**Keywords:** hydrothermal mineral formation, opal, mordenite, heulandite

## Фазовый состав отложений гейзера Великан (Долина Гейзеров, Камчатка)

Сергеева А.В.

*Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, Пийна-9, Петропавловск-Камчатский 683006*

Исследован фазовый (минеральный) состав образца отложений гейзера Великан, расположенного в Долине Гейзеров (Камчатка). Образец, отобранный на устье гейзера, был исследован методами рентгеновской дифрактометрии (Shimadzu XRD 7000) и инфракрасной спектроскопии (IR Affinity).

**Ключевые слова:** гидротермальное минералообразование, опал, морденит, гейландит

### Введение

Извержения гейзеров имеет результатом формирование мощных толщ отложений, в составе которых преобладают опал, кварц, высококремнистые цеолиты, иногда встречаются слоистые силикаты. На минеральный состав гейзерных отложений влияет состав воды на устье, температурный режим, поэтому исследование их минеральных ассоциаций актуально как с точки зрения поведения флюида на испарительном барьере, так и с точки зрения описания минералообразующих процессов, реализующихся в специфичных условиях современных термоаномалий. Осадки на устьях гейзеров чувствительны к составу раствора, из которого происходит их кристаллизация, поэтому изучение состава отложений позволяет отследить динамику физико-химических параметров термальных растворов.

### Методика эксперимента

Исследованы осадки, сформированные на логгерах (приборах для автономного длительного мониторинга температуры), отложения гейзеритовых (травертиновых) плащей гейзера Великан. Образцы были отобраны в период 2011 – 2018 гг.

Исследование минерального (фазового) состава было выполнено методами инфракрасной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии.

ИК спектры поглощения были записаны на инфракрасном спектрофотометре IR Affinity (Shimadzu), в диапазоне волновых чисел  $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$ , с разрешением  $4 \text{ см}^{-1}$ . Воздушно-сухие образцы растирали с бромидом калия и прессовали в таблетки.

Дифрактограммы были записаны с помощью рентгеновского дифрактометра XRD 7000 (Shimadzu) в диапазоне углов  $6 - 60^\circ 2\theta$ , шаг составлял  $0,1^\circ 2\theta$ . Скорость сканирования составляла  $1 \text{ град./мин}$ , что эквивалентно выдержке в точке  $3 \text{ с}$ .

Идентификация дифрактограмм была осуществлена в программе Powder-Cell, путем сравнения экспериментальных и теоретических кривых. Уточнение профильных параметров было выполнено с помощью встроенного в программу алгоритма, реализующего метод Ритвельда.

## Результаты и обсуждение

По данным инфракрасной спектроскопии, гейзеритовый плащ гейзера Великан (рис. 1) состоит из опала, частично переходящего кварц, и переменного количества высококремнистых цеолитов (рис. 1, 2).



Рисунок 1 – Образец гейзеритового плаща гейзера Великан, с высверленными отверстиями для взятия проб; нумерация снизу вверх: 1 (нижняя часть образца, не видна на фото), 2, 3, 4, 5

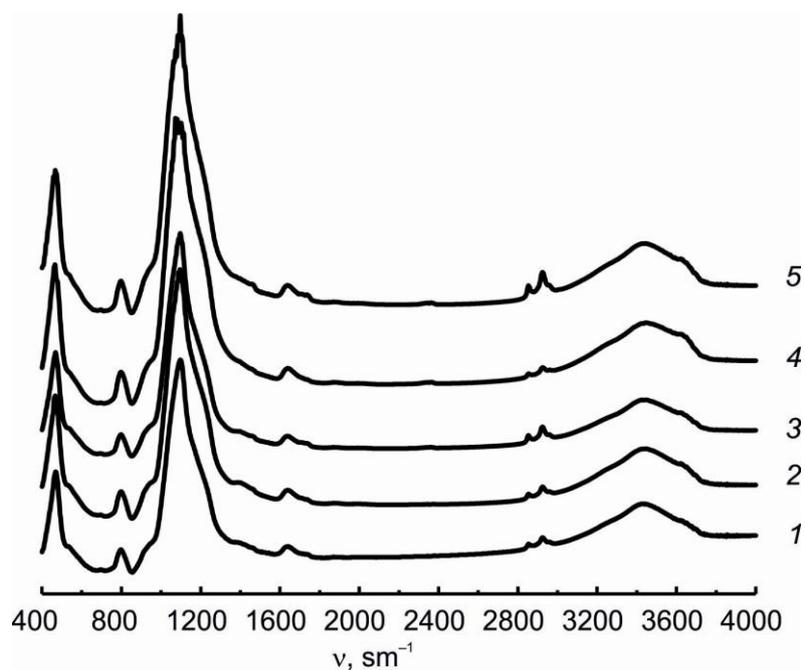


Рисунок 2 – Инфракрасные спектры гейзеритового плаща гейзера Великан, при движении снизу плаща (1) к внешней поверхности (5)

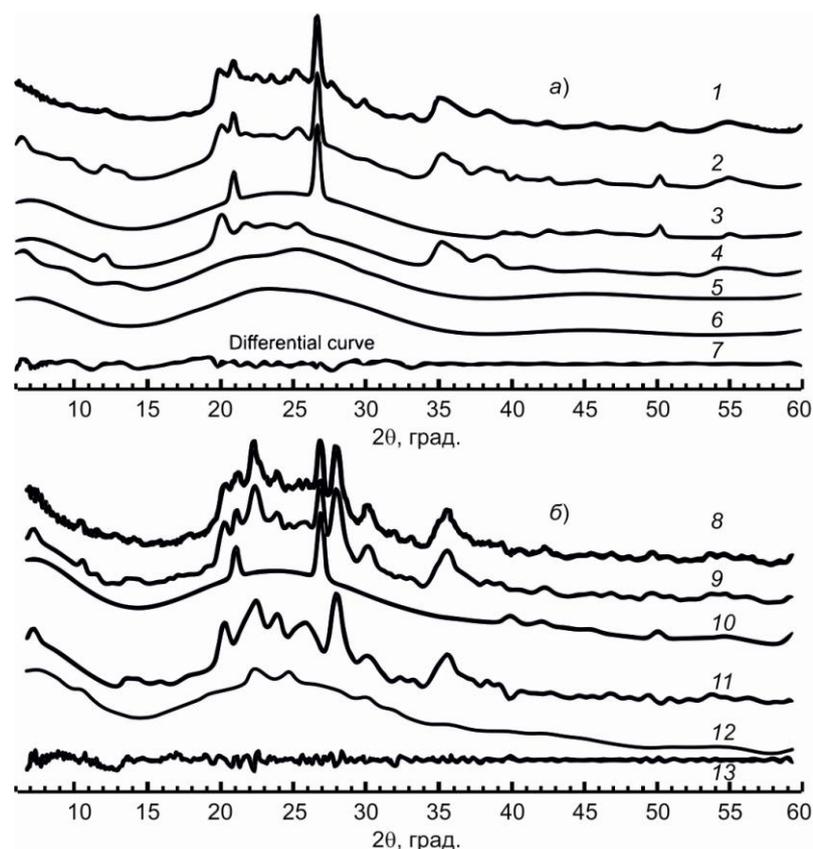


Рисунок 3 – Экспериментальная дифрактограмма отложений на логгере Великан в 2011 г (1), теоретическая дифрактограмма (2) как сумма уточненных кривых кварца (3), каолинита (4), морденита (5), гейландита (6), разница теоретической и экспериментальной кривых (7); экспериментальная дифрактограмма отложений на логгере Великан в 2018 г (8), теоретическая дифрактограмма (9) как сумма уточненных дифрактограмм кварца и опала (10), морденита (11), гейландита (12), разница теоретической и экспериментальной кривых (13)

Основные полосы поглощения относятся к опалу, аморфному гидратированному  $\text{SiO}_2$ . В высокочастотной области ( $3000 - 4000 \text{ см}^{-1}$ ), в которой расположены колебания молекул воды и ОН-групп, расположена широкая интенсивная полоса поглощения.

В области  $900 - 1200 \text{ см}^{-1}$  расположена основная полоса поглощения кремнекислородного скелета, она раскладывается на несколько гауссовых составляющих, одна из которых, с максимумом  $1055 \text{ см}^{-1}$ , в ряде источников относится к гейландиту (рис. 2). На дифрактограммах материала отложений фиксируются опал, кварц, гейландит и морденит. Минералы гейзеритового плаща новообразованные, плохо окристаллизованы, рефлексy сильно размыты, видно гало от аморфного опала. Можно отметить возрастание интенсивности полос поглощения цеолитов в направлении верхней части гейзеритового плаща.

На логгерах в гейзере Великан (рис. 3) в 2011 и 2018 г сформировались отложения, содержащие минералы группы каолинита. В отложениях 2018 г количество минералов группы каолинита резко снижается, возрастает содержание цеолитов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 18-05-00052 и гранта РНФ № 16-17-10008.*

## References

1. Zhdanov S.P., Khvoschev S.S., Samulevich N.N. Synthetic zeolites. 1981. M.: Chemistry. p. 264.
2. Kiryukhin A. V., Rychkova V. V., Dubrovskaya I. K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide // Applied Geochemistry. 2012. V. 27. p. 1753-1766.

3. A. Kiryukhin, V. Sugrobov, and E. Sonnenthal. Geysers Valley CO2 Cycling Geological Engine (Kamchatka, Russia) // *Geofluids*. 2018. ID 1963618, 16 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/1963618>.

4. Alexey Kiryukhin. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2016. P. 129–147.

5. Кирюхин А.В., Рычкова Т.В. Условия формирования и состояние гидротермальной системы Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2011. № 3. С. 238-253.

## **Synthesis of initial Geological Data for the Purposes of Modeling of Exploitation of a Bolshe-Banny Geothermal Field: methods and results**

**Ivan F. Delemen**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky 683006, Russia  
delemen@kscnet.ru*

**The purpose** of this study is to multipurpose interpretation and compile data on the structure of the Bolshe-Banya geothermal field, to construction a conceptual 3D model of the geological structure of its reservoir. The obtained data can be used in assessing the quantitative geological parameters of the hydrothermal reservoir in computer simulation of its operation.

**The basic method** of conceptual modeling of a 3D structure of a reservoir is field mapping of reservoir structure elements observed on the earth's surface. All identified unloading zones of thermal waters, their types and temperatures were mapped. The interpretation of the results was carried out taking into account the published and archival data on the geological structure of this geothermal deposit.

**The results** of our research in general do not contradict the reservoir structure models developed earlier. The mapping of a large hilly-western landslide body, which covers the alluvial sediments of the Bannaya River, was carried out. The spatial position and the ratio of disjunctive disorders of various orders: faults, fractures and cracks are specified. In the central part of the geothermal field, a previously unknown large active zone of stretching and subsidence was extended in the sublatitudinal direction.

**Conclusion:** The location of the zones of unloading of thermal waters on the earth's surface is determined by the spatial ratio of faults that drain the reservoir and the overburden deposits that cover them. Extended sub-latitudinal zone of extension and subsidence was formed over the actuated part of the tank during its continued exploitation.

**Keywords:** geothermal field, caprock, soil gases, temperature

## **Синтез исходных геологических данных для целей моделирования эксплуатации Больше-Банного геотермального месторождения: методы и результаты**

**Делемень И.Ф.**

*Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, Пийна-9, Петропавловск-Камчатский 683006*

**Целью** данного исследования является комплексная интерпретация и обобщение данных о строении Больше-Банного геотермального месторождения, для построения концептуальной 3D модели геологического строения его резервуара. Полученные данные могут быть использованы при оценке количественных геологических параметров гидротермального резервуара при компьютерном моделировании его эксплуатации.

**Основной метод** концептуального моделирования 3D структуры резервуара – полевое картирование элементов структуры резервуара, наблюдаемых на земной поверхности. Выполнено картирование всех выявленных зон разгрузки термальных вод, их типов и температур. Интерпретация результатов была проведена с учетом опубликованных и архивных данных о геологическом строении этого геотермального месторождения.

**Результаты** нашего исследования в целом не противоречат разработанным ранее моделям строения резервуара. Выполнено картирование крупного холмисто-западного обвального тела, которое перекрывает аллювиальные отложения реки Банная. Уточнены пространственное положение и соотношение дизъюнктивных нарушений различного порядка: разломов, разрывов и трещин. В центральной части геотермального поля была обнаружена не известная ранее крупная активная зона растяжения и просядков, вытянутая в субширотном направлении.

**Вывод:** Местоположение зон разгрузки термальных вод на земную поверхность определяется пространственным соотношением разрывных нарушений, которые дренируют резервуар, и перекрывших обвальных отложений. Протяженная субширотная зона растяжения и просядков сформировалась над срабатываемой частью резервуара при его продолжающейся эксплуатации.

**Ключевые слова:** геотермальное месторождение, водоупор, почвенные газы, температура

Больше-Банное геотермальное месторождение является одним из перспективных объектов развития ресурсной базы для геотермальной энергетики Камчатского края (Сугробов, Кононов, Вереина. 2005). **Целью** данного исследования является оценка возможных подходов к развитию методологии комплексной интерпретации и обобщения данных о строении Больше-Банного геотермального месторождения, для построения концептуальной 3D модели геологического строения его резервуара и всей геотермальной системы.

Изучение любого месторождения, тем более в условиях таких удаленных районов с экстремальными природными условиями, требует значительных затрат. Поэтому их изучение, основанное на использовании новейших геолого-геофизических и инструментальных технологий, предусматривает использование результатов предшествующих исследований. Важной особенностью больших массивов однотипных данных является наличие скрытой информации, не проявляющейся явно в каждом из опубликованных, архивных источников информации, или в диссертационных исследованиях. На этом основаны технологии контент-анализа и BigData, пришедшие в науки о Земле из социально-гуманитарных наук, и основанные на сборе, систематизации и последующем компьютерном анализе собранных структурированных и не структурированных больших объемов данных значительного многообразия.

С другой стороны, важнейшим инструментом изучения геотермальных месторождений является математическое моделирование тепломассопереноса в гидротермальных резервуарах (Кирюхин, 2002)., а в более широком плане – в недрах геотермальных резервуаров, вулканов и вулканических систем. Использование современных методов компьютерного моделирования требует тщательного выбора начальных и граничных условий (Кирюхин, Pruess, 2004)..

Полученные данные могут быть использованы при оценке количественных геологических параметров гидротермального резервуара Больше-Банного геотермального месторождения при компьютерном моделировании его эксплуатации.

**Основной метод** концептуального моделирования 3D структуры резервуара – полевое картирование элементов структуры резервуара, наблюдаемых на земной поверхности. Выполнено картирование всех выявленных зон разгрузки термальных вод, их типов и температур. Интерпретация результатов была проведена с учетом опубликованных и архивных данных о геологическом строении этого геотермального месторождения. При интерпретации особое внимание обращено на разбиение геологического пространства на домены и кластеры. Разбиение проводилось в два этапа.

На первом этапе выделены латерально протяженные **домены** структуры геотермального резервуара, представляющие собой систему пространственно ограниченных, прилегающих друг к другу трансверсально-изотропных горизонтально ориентированных пластин, соответствующих основным литолого-стратиграфическим единицам, проницаемость которых определяет пространственное распределение в резервуаре субгоризонтальных и пологих водоносных комплексов и водоупоров.

На втором этапе в каждой из этих пластин выделены включения, отличающиеся по своим физико-механическим и гидрогеологическим свойствам от параметров вмещающей их среды. В геологическом отношении эти включения соответствуют секущим слою разрывам, дайкам, локальным зонам дробления и трещиноватости, милонитизации; гидротермального выщелачивания и кольматации трещин и пор, а также участкам локальной фациальной изменчивости в литологическом составе слоев. Включения могут быть изолированными, однако, соприкасаясь, объединяются в сквозные цепочки, пересекающие всю пачку слоев, от подошвы резервуара (бедрок) до земной поверхности (кепрок).

**Кластеризация** пространства для выделения доменов осуществляется с учетом данных по скважинам, зонам разгрузки термальных и холодных грунтовых вод,

поверхностным водоемам, обнажениям горных пород, точкам полевых наблюдений, а также точкам и профилям геофизических наблюдений и геофизическим разрезам.

### Результаты и обсуждение

В качестве основы для разработки 3-D доменно-кластерной модели геотермального резервуара Больше-Банного геотермального месторождения были использованы результаты проводившихся здесь в 60-70-х прошлого века геолого-съёмочных, поисковых и разведочных работ (Краевой и др., 1971; Сережников, Зимин, 1976). Горизонтальные слои представлены четырьмя доменами (сверху вниз):

Домен I1 – Постплиоценовые полигенные и полифациальные неконсолидированные и нецементированные осадочные отложения (плейстоцен-голоцен) – пески, гравийно-галечные дресвяно-щебенистые отложения, валунники;

Домен I2 – Вулканогенные породы позднемиоцен-плиоценового возраста ( $N_1^3$ - $N_2$ ): лавы, туфы смешанного состава, туфолавы липаритов, туфоконгломераты;

Домен I3 – Игнимбриты среднемиоценового возраста ( $N_1^2$ );

Домен I4 – Туфоандезиты среднемиоценового возраста ( $N_1^2$ ).

В принципе, по геофизическим данным можно выделить в основании домена I4 и пятого домена, т.к., по данным С.Е. Апрелькова, на территории всей Южной Камчатки, фундаментом для кайнозойских осадочных и вулканогенных отложений служат верхнемеловые вулканогенно-кремнистые и терригенные метаморфизованные интенсивно дислоцированные породы (Апрелков, 1971), причем в бассейне реки Банная известны обнажения вулканогенно-кремнистых пород, накопление которых произошло в позднемеловое время в условиях относительного глубоководного морского или океанического бассейна (Апрелков и др., 2001).

Еще пять доменов представляют собой тела, дискордантные по отношению к перечисленным выше доменам (в порядке увеличения возраста):

Домен II1 - дайки четвертичных базальтов (Q);

Домен II2 - плиоценовые субвулканические и дайковые тела – андезидациты, липаридациты, липариты ( $\alpha$ ,  $\zeta N_2$ );

Домен II3 - среднемиоценовый интрузивный массив – липариты, гранодиориты ( $\lambda, \sigma N_1^2$ );

Домен II4 - тектонические нарушения, зоны дробления и трещиноватости

Домен II5 - гидротермалиты, зоны гидротермальных изменений, выщелачивания и кольматации.

В целом каждый из доменов обладает изотропностью проницаемости, тепловых свойств и иных физико-механических и гидрогеологических параметров, лишь в первом приближении.

Так, например, локализация термальных источников в прирусловой полосе поймы р. Банная в значительной мере обусловлена фациальной изменчивостью рыхлых четвертичных отложений, выполняющих долину реки. Кроме того, не менее важную роль играют и генетические отличия. Так, более высокая проницаемость крупноглыбовых обвальных отложений (с высокой пустотностью супесчано-песчаного наполнителя вблизи глыб), чем у иных типов четвертичных отложений в долине реки, предопределила различия в пространственном распределении и локализации зон разгрузки термальных вод, стекающих по рыхлым отложениям к местному базису эрозии.

Непосредственно на земной поверхности в пределах месторождения наши полевые исследования позволили установить только четыре коренных обнажения, в которых можно наблюдать трещиноватость в скальных породах. В частности, в одном из обнажений на берегу р. Банная, было установлено наличие пяти преобладающих направлений трещиноватости сколового типа (субширотного и субмеридионального, двух диагональных простираний, и пологих трещин). Примечательно, что среди трещин многочисленных направлений, хорошо выделяются трещины отрыва, как зияющие, так и выполненные кальцитом и кварцем. Такие трещины имеют субвертикальные падения и

субмеридиональное пространство, в обнажениях они образуют сгущения, формируя неширокие (не более 1 м) проницаемые зоны.

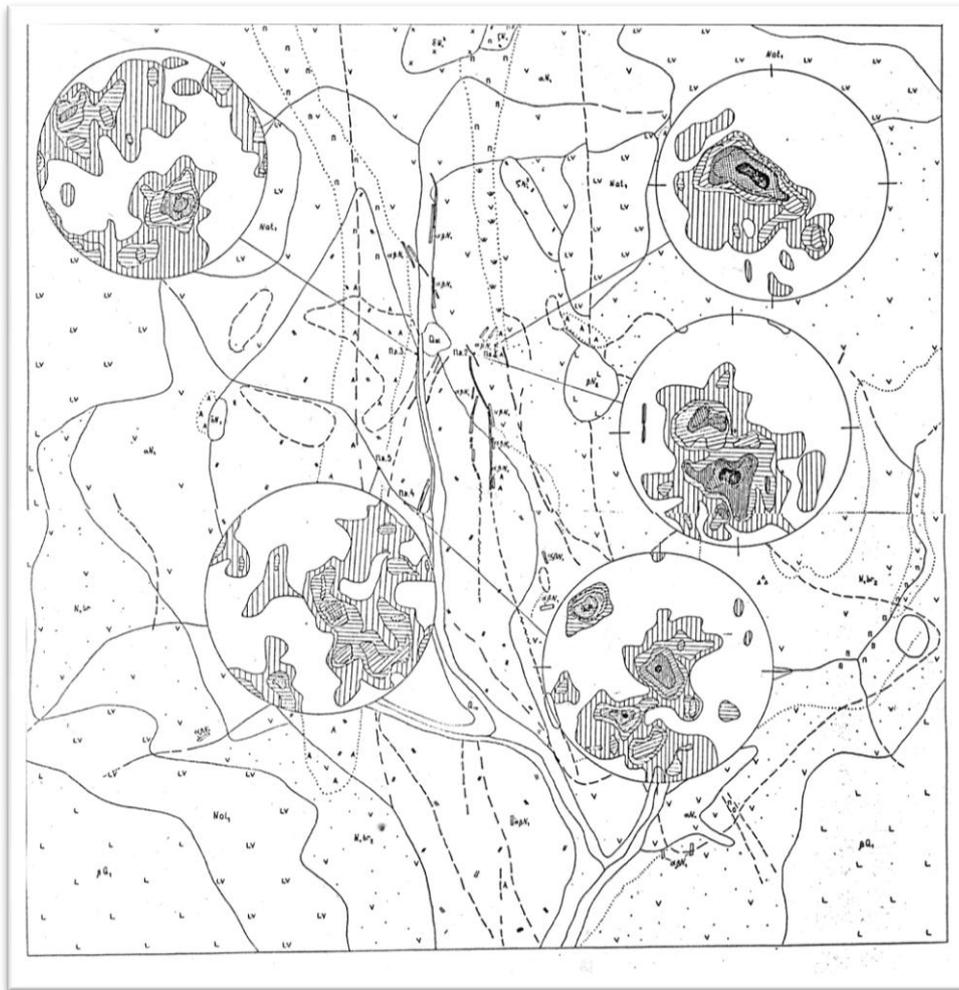
Следует отметить, что в местах расположения даек трещины развиваются преимущественно в призальбандовых участках вмещающих пород.

Для выявления закономерностей распределения трещиноватости во вмещающих породах, соответствующих условиям в геотермальном резервуаре на более глубоких горизонтах, нами была выполнена интерпретация массовых измерений трещиноватости, выполненных совместно с геологами ПГО «Камчатгеология» при разведке эпитермальных месторождений и рудопроявлений благородных металлов, расположенных у границ геотермального месторождения. На рисунке 1 приведены стереограммы трещиноватости на территории эродированной эпитермальной системы, расположенной вблизи южных границ Больше-Банной гидротермальной системы. Параметры трещиноватости были измерены на этой системе на трех площадках, расположенных в ареалах залегания миоцен-плейстоценовых вулканитов (березовская свита и алнейская серия), соответствующих по возрасту и идентичным по составу вулканитам, слагающим резервуар Больше-Банной гидротермальной системы.

Возраст эпитермальной системы принят эоплейстоценовым на основании радиологического датирования. Радиологический возраст (K-Ar) расположенной у южных границ Больше-Банного термального поля экструзии риолитов, определен в 1,2 млн. лет. Кроме того, имеются две калий-аргоновые датировки (0,8 и 1,3 млн. лет) аналогичных риолитов (Боровцов и др., 2001).

Мы полагаем, что одной из важнейшей задач дальнейших исследований Больше-Банной гидротермальной системы является уточнение стратиграфической позиции и возраста вулканитов в пределах современной гидротермальной и смежных предположительно эоплейстоценовых эпитермальных систем. Это позволит уточнить вопрос о природе, параметрах и местоположении источника теплового питания гидротермальной системы.

Результаты нашего исследования в целом не противоречат разработанным ранее моделям строения резервуара. Выполнено картирование крупного холмисто-западного обвального тела, которое перекрывает аллювиальные отложения реки Банная. Уточнены пространственное положение и соотношение дизъюнктивных нарушений различного порядка: разломов, разрывов и трещин. В центральной части геотермального поля была обнаружена не известная ранее крупная активная зона растяжения и просадок, вытянутая в субширотном направлении. Местоположение зон разгрузки термальных вод на земную поверхность определяется пространственным соотношением разрывных нарушений, которые дренируют резервуар, и перекрывающих их обвальных отложений. Протяженная субширотная зона растяжения и просадок сформировалась над срабатываемой частью резервуара при его продолжающейся эксплуатации.



*Рисунок 1 – Стереограммы трещиноватости (сетка Шмидта, верхнее полупространство) на пяти площадках измерений, расположенных на территории эродированной предположительно эоплейстоценовой эпитермальной системы*

Для рассматриваемой территории характерно длительное развитие магматических процессов. В настоящее время признаки вулканизма или верхнекоревой магматической активности не отмечены, хотя на окружающих территориях за последние десятилетия инструментальных наблюдений было зарегистрировано несколько роев тектонических и вулкано-тектонических землетрясений (Пак, Пономарев, 1985; Кугаенко, Нуждина, 2009). Среди них событий интерес для понимания процессов флюидно-магматического теплопереноса представляют низкочастотные землетрясения, которые, по мнению Ю.А. Кугаенко, обусловлены деформациями среды при перемещении флюидов и магмы в коре.

### **Заключение**

Дальнейшее развитие геологической 3-D модели Больше-Банного месторождения парогидротерм может идти по пути заполнения доменов количественными данными, источниками которых могут быть не только, и не столько опубликованные количественные данные, собранные из различных источников. В частности, уже опубликованные работы (Краевой и др., 1976; Леонов, Rogozin, Sobolevskaya, 2008), диссертационные исследования (Трухин, 2002) а архивные гидрогеологические и гидрогеотермические данные могут

Классические модели современных высокотемпературных гидротермальных систем предполагают их теплое питание за счет транспортировки магматических расплавов с глубин Земли в недра вулканов и долгоживущих вулканических центров (Белоусов, 1978). В последние годы появляется все больше данных о том, что магматические процессы следует

рассматривать в более широком плане, с учетом многофазности теплоносителя, а также взаимодействия магматических потоков с потоками воды и газов.

Не совсем ясна структурная позиция Больше-Банного месторождения. Одни авторы однозначно связывают его с магматической питающей системой вулканического центра сопки Горячая, другие (Леонов, Рогозин, 2007) – с предполагаемой гигантской кальдерой-супервулканом, третьи – с палеовулканом сопки Ягодная.

Анализ уже накопленных и систематизированных геолого-геофизических, геоморфологических и геофизических данных позволяет сделать вывод о том, что Больше-Банное геотермальное месторождение является частью единой литосферно-коревой системы флюидно-магматического теплопереноса.

Дальнейшее развитие модели Больше-Банного месторождения с использованием технологий BigData, предполагает использование набора как минимум трех признаков, VVV – volume, velocity, variety (MinChen et al. 2004). Поэтому для индикации геотермальной системы целесообразно привлечение не только геолого-геофизических и геотермических параметров, непосредственно относящихся к структуре и свойствам гидротермального резервуара, но и те, которые имеют к ним косвенное отношение, такие как геохимические особенности пород и термальных вод (например, Чудаев, 2016), или же геоботанические данные (например, Самкова, 2014; Самкова, Рылова, Кляпицкий, 2016).

*Работа выполнена в рамках темы "Теплоперенос и сейсмичность в гидротермальных, магматических и геофлюидных системах, термогидродинамическое-геохимическое-геомеханическое моделирование (TOUGH2, TOUGHREACT, C-FRAC), приложения для оценки геотермальных ресурсов и прогноза землетрясений" (№ 0282-2016-0002; № 0282-2018-0017) Плана научно-исследовательской работы ИВиС ДВО РАН на 2018 г. (пункт 137 Программы ФНИ государственных академий наук на 2013-2020 годы).*

#### **Список литературы**

1. *Апрелков С.Е.* Тектоника и история вулканизма Южной Камчатки // *Тектоника*. 1971. № 2. С. 105-111.
2. *Апрелков С.Е., Попруженко С.В., Богдан П.С., Касьянюк Е.Е.* Структуры фундамента и локализация вулканизма Южной Камчатки. В кн.: *Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы*. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН. 2001. С. 58-74.
3. *Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей. М.: Наука. 1978. 176 с.
4. *Боровцов А. К., Ярыш Г. В., Бархатов Ю. В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Хангарская. Лист N-57-XXVI (Дальний). Объяснительная записка. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 181 с.
5. *Кирюхин А.В.* Моделирование эксплуатации геотермальных месторождений. Владивосток: Дальнаука. 2002. 216 с.
6. *Кирюхин А.В., Pruess К.* Моделирование геотермальных процессов: Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2004. 102 с.
7. *Краевой Ю.А., Коваленко В.Я., Евтухов А.Д.* Больше-Банная гидротермальная система на Камчатке. В кн. *Вулканизм глубины Земли*. М.: Наука. 1971. С. 246-253.
8. *Краевой Ю.А., Охапкин В.Г., Сережников А.И.* Результаты гидрогеологических и геотермических исследований Большебанной и Карымчинской гидротермальных систем В кн. *Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки*. Владивосток. 1976. С. 179-211.
9. *Кугаенко Ю.А., Нуждина И.Н.* Сейсмичность вулкана Мутновский по данным станции «Мутновка»: первые результаты, ноябрь 2008 – февраль 2009 гг. В кн. *Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 0-31 марта 2009 г.* Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2010. С. 157-166.

10. *Леонов В.Л., Rogozin A.H., Соболевская О.В.* Результаты термометрической съемки Больше-Баннх термальных источников (Южная Камчатка) // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2008. С. 197–206.
11. *Леонов В.Л., Rogozin A.H.* Карымшина - гигантская кальдера-супервулкан на Камчатке: границы, строение, объем пирокластики // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 14-28.
12. *Пак Г., Пономарев П.М.* Рои вулканических землетрясений на Юго-Восточной Камчатке в 1981 – 1984 гг. В кн.: Вулканизм и связанные с ним процессы. Выпуск 1. Тезисы докладов VI Всесоюзного вулканологического совещания. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 226-227.
13. *Самкова Т.Ю.* Связь между пространственной структурой гидротермального процесса и распространением сообществ лапчатки побегоносной на термальных полях Паужетской и Больше-банной гидротермальных систем (Южная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2014. № 1, выпуск 23. С. 186-199.
14. *Самкова Т.Ю., Рылова С.А., Кляпицкий Е.С.* Пространственная неоднородность термального поля и ее отражение в структуре растительного покрова юго-восточного участка Больше-Банного месторождения (Южная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2016. № 3, выпуск 31. С. 18-27.
15. *Серезников А.И., Зимин В.М.* Геологическое строение Паратунского геотермального района, влияние отдельных геологических факторов на на современную гидротермальную деятельность. В кн.: Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток. 1976. С. 115-142.
16. *Сугробов В.М., Кононов В.И., Вереина О.Б.* Перспективы использования геотермальных ресурсов Камчатки // Энергосбережение. 2005. № 2. С. 98-102.
17. *Трухин Ю.П.* Современные геотермальные процессы и перспективные геотермальные геотехнологии. Дисс. на соиск. уч. степени докт. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский: НИГТЦ ДВО РАН. 2002. 523 с.
18. *Чудаев О.В., Челноков Г.А., Брагин И.В. и др.* Геохимические особенности распределения основных и редкоземельных элементов в Паратунской и Большебанной гидротермальных системах Камчатки // Тихоокеанская геология. 2016. Том 35, № 6. С. 102-119.
19. *Min Chen, Shiwen Mao, Yin Zhang, Victor C.M. Leung.* Big Data. Related Technologies, Challenges, and Future Prospects. Springer, 2014. 100 p.

Научное издание

**Material II Geothermal Volcanology Workshop 2018, 05 - 08 September, 2018**

**Материалы II Международного научного совещания по проблемам геотермальной  
вулканологии, 5-8 сентября 2018 г.**

Сдано в набор NN.11.2018  
Подписано к печати NN.11.2018  
Дата выхода: NN.11.2018  
Формат 60x84/8  
Бумага типографская  
Гарнитура «Таймс»  
Усл.-печ. л. NN

Заказ № NN

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в ИВиС ДВО РАН,  
в ООО «ФОН», 6830023, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9,  
тел. 8(4152) 490-337, 490-338