



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФГБУН ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

PROCEEDINGS

of All-Russian Scientific Conference
with International Participation

«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology»
(Geothermal Volcanology Workshop 2021)

Conference was supported by RFBR grant 21–55–50003 ЯФ

**Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky
September 6–11, 2021**



ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ

2021



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии

Дальневосточное отделение

Российская академия наук

**Всероссийская научная конференция
с международным участием
«Геотермальная вулканология, гидрогеология,
геология нефти и газа»
(Geothermal Volcanology Workshop 2021)**

6–11 сентября 2021 г.

Конференция проведена при поддержке РФФИ по проекту 21–55–50003 ЯФ

Материалы конференции



ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ

2021

УДК 550.36+551.21+553.6+556.3

Научное издание

Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2021), 6–11 September, 2021 – Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2021. – 171 p.

Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2021), 6–11 сентября 2021 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. – 171 с.

ISBN 978-5-902424-35-2

This Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil & Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2021) was held in Petropavlovsk-Kamchatsky in 2021 by Institute of Volcanology & Seismology FEB RAS. The results of geothermofluidmechanics studies of the volcanic, hydrothermal & hydrocarbon systems are presented.

В сборнике представлены материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2021), проведенной Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в 2021 г. Освещаются результаты исследований геотермофлюидомеханики вулканических, гидротермальных и углеводородных систем.

Утверждено к печати
Ученым советом
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Редакционная коллегия:
д.г.-м.н., проф. А.В. Кирюхин, доктор, проф. Нориоши Тсучия
Dr., Prof. Alexey Kiryukhin, Dr. Prof. Noriyoshi Tsuchiya

Отв. редактор:
д.г.-м.н. А.В. Кирюхин

Ответственные секретари:
О.А. Гололобова, Е.В. Черных, М.В. Кузнецова

ISBN 978-5-902424-35-2

© ИВиС ДВО РАН, 2021

Table of Contents

CHAPTER I. HYDROTHERMAL SYSTEMS OF VOLCANIC AREAS

Larisa Vorozheikina

Geothermal deposits of the Paratunsky depression – Paratunskoye and Verkhne-Paratunskoye 10

Nikita Zhuravlev

TOUGH2-modeling of the water recharge conditions
for the Upper-Paratunskiy geothermal field 17

Olesya Zoben'ko, Viktor Okrugin, Ivan Chernev

The material composition of the rocks
in the steaming zones of the Mutnovsky geothermal field (South Kamchatka)..... 21

Valentina Svalova

Hydrogeothermal Systems of the Caucasus Region..... 23

Surmaazhav Damdin, Batzhargal Damba, Ariunaa Chinbat

Features of the composition of thermal waters of the Khulzh deposit 27

CHAPTER II. MAGMA-HYDROTHERMAL SYSTEMS

Alexey Kiryukhin

Geothermal energy worldwide use 33

Noriyoshi Tsuchiya, Fajar Febiani Amanda

High Temperature Silicified Zone as a Cap-Rock for Supercritical Geothermal Fluids..... 39

Vladimir Belousov, Galina Koroleva, Olga Khubaeva

Gold in hydrothermal-magmatic systems: The colloidal concept 43

Alexey Plyusnin

Formation of Carbon Dioxide Flow on the Territory of Northeast Asia..... 47

Masaoki Uno, Noriyoshi Tsuchiya

Budget of Slab-derived Water in Arc Crust:
Constraints from Crust-Melt Reaction Zones and Fossil Caldera Differentiation Processes..... 51

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

Dzumagul Kendirbaeva

Modern hydrothermal Systems and Fluid Degassing of the Kyrgyz Tien Shan 55

Alexey Solomatin

Two-stroke geofluidic model of the strongest Pacific earthquakes foci development on the
example of the Tohoku earthquake (March 11, 2011, M = 9,1) 58

Mindaleva Diana, Masaoki Uno, Noriyoshi Tsuchiya

Fluid-driven crustal fracturing mechanism
in the middle-lower crust preserved in metamorphic reaction zones 62

Andrey Polyakov

Inflow of magmatic gases into the Mutnovsky geothermal reservoir according to observations of P_{CO_2} at the condenser of the GEOPP in 2019–2020.....	66
--	----

CHAPTER IV. MAGMATIC SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

Michail Lemzikov, Alexei Kiryukhin

Analysis of the magmatic activity of Klyuchevskoy volcano before the lateral eruption of 2021 using the program Frac-Digger.....	71
--	----

Alexey Kotov, Sergey Smirnov, Noriyoshi Tsuchiya, Masaoki Uno

Behavior of volatile components in the magmatic system of Mendeleev volcano (Kunashir Island).....	75
--	----

Sergey Voropaev, Vyacheslav Sevastyanov, Nikita Dushenko, Veniamin Fedulov

Carbon isotopy as an indicator of fluid-magma interaction conditions.....	80
---	----

Mikhail Puzankov, Alexey Kiryukhin, Alexey Ivanov

Supply Dikes of the Feeding System of the Koryaksky Volcano (Kamchatka)	83
---	----

Nataliya Malik, Viktor Okrugin, Irina Lukashevskaya

Temperature and Gas Composition Dynamics of the Fumaroles of Avachinsky Volcano in 2013–early 2021	87
--	----

Evgenia Chernykh

Magmatic fracking Avachinsky volcano cone in 2001–2020	91
--	----

CHAPTER V. MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER, GEOMECHANICAL PROCESSES AND CHEMICAL INTERACTION IN GEOFLUIDIC SYSTEMS

Vadim Gordienko

Thermal Model of Avacha Volcano	96
---------------------------------------	----

Vadim Gordienko, Ivan Gordienko

Thermal Models of Ore Zones.....	100
----------------------------------	-----

Nataliya Suk, Alexey Kotelnikov

Phenomena of silicate-carbonate and silicate-silicate immiscibility in fluid-magmatic systems (experiment).....	104
---	-----

Alexey Kotelnikov, Nataliya Suk, Zoya Kotelnikova

Fluid-magmatic systems in the decompression regime and volcanism processes	109
--	-----

Mikhail Lavrentiev, Andrey Marchuk, Konstantin Oblaukhov, Alexey Romanenko

PC based fast numerical modeling	113
--	-----

Alexander Shulyupin, Alexey Lyubin, Ivan Chernev

Estimation of well efficiency in the par-lift extraction of coolant at the Mutnovsky field (Kamchatka) during the development of deep horizons.....	117
---	-----

CHAPTER VI. CONDITIONS FOR THE FORMATION OF PRODUCTIVE GEOTHERMAL RESERVOIRS AND HYDROCARBON DEPOSITS WITH HARD-TO-RECOVER RESERVES

Lyudmila Boldushevskaya

Volcanic rocks of the lower Triassic of the Yenisei-Khatanga regional trough and adjacent territories: manifestation of hydrothermal processes, sources of bitumen 127

Larisa Lyamina, Natalia Kharitonova

Helium isotopes in the spring of Kamchatka 131

Ainur Bayramova

Application of the double porosity scheme for the analysis of the history plot of the water-methane field 135

Tatiana Korovina, E. A. Romanov, Ekaterina Kropotova

Role of tectonics and subsurface fluid dynamics in formation of oil and gas productive deposits of Upper Paleozoic and Jurassic complexes of West Siberia 138

Pavel Voronin, Alexey Kiryukhin

Thermohydrodynamic modeling of the conditions for the formation of the hydrothermal system in the southwestern sector of the Koryaksky volcano 142

Ivan Delemen

Some Methodological Aspects of Increasing the Resource Potential of Hydrocarbons in Kamchatka 148

CHAPTER VII. THE MECHANISM OF FUNCTIONING OF GEYSERS AND CATASTROPHIC PROCESSES IN HYDROTHERMAL SYSTEMS

Gennadiy Karpov

Geysers of the Akademia nauk caldera (Kamchatka): location, morphology, dynamics of eruptions, evolution of water composition 153

Anastasia Sergeeva, Alexey Kiryukhin, Nikita Zhuravlev, Tatiana Rychkova, Elena Kartashova, Maria Nazarova

Changes in the Mineral and Elemental Composition of Geysers Deposits from 2018 to 2021 157

Olga Usacheva

TOUGH2-EOS1 modeling of the effect of infiltration into a two-phase geyser reservoir on the dynamics of natural discharge of hydrotherms 161

Tatiana Rychkova

Cyclicity eruptions of the Bolshoi geyser in 2020–2021 (Kronotsky Reserve, Kamchatka) 165

Содержание

РАЗДЕЛ I. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

<i>Ворожейкина Л.А.</i> Геотермальные месторождения Паратунской депрессии – Паратунское и Верхне-Паратунское.....	10
<i>Журавлев Н.Б.</i> TOUGH2-моделирование условий водного питания Верхне-Паратунского геотермального месторождения	17
<i>Зобенько О.А., Округин В.М., Чернев И.И.</i> Вещественный состав пород зон пропаривания Мутновского геотермального месторождения (Южная Камчатка).....	21
<i>Свалова В.Б.</i> Гидрогеотермальные системы Кавказского региона.....	24
<i>Сурмаажав Дамдин, Батжаргал Дамба, Ариунаа Чинбат</i> Особенности состава термальных вод месторождения Хульж (Центральная Монголия)	27

РАЗДЕЛ II. МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Кирюхин А.В.</i> Использование геотермальной энергии в мире.....	33
<i>Нориёси Цучия, Фаджар Фебиани Аманда</i> Высокотемпературная кремнистая зона как покровный слой для сверхкритических геотермальных флюидов	39
<i>Белоусов В.И., Королева Г.П., Хубаева О.Р.</i> Золото в гидротермально-магматических системах: коллоидная концепция.....	43
<i>Плюснин А.М.</i> Формирование потока углекислого газа на территории северо-восточной Азии	47
<i>Масаоки Уно, Нориёси Цучия</i> Баланс воды в зоне субдукции: ограничения, обусловленные зонами реакции кора-расплав и процессами дифференциации реликтовых кальдер	51

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

<i>Кендирбаева Дж.Ж.</i> Современные гидротермальные системы и флюидная дегазация Кыргызского Тянь-Шаня	55
<i>Соломатин А.В.</i> Двухтактная геофлюидодинамическая модель развития очагов сильнейших Тихоокеанских землетрясений на примере землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г., $M = 9,1$	58
<i>Миндалева Диана, Масаоки Уно и Нориёси Цучия</i> Флюидный механизм образования трещин в нижних и средних слоях коры, заклученный в метаморфических зонах взаимодействия.....	63
<i>Поляков А.Ю.</i> Приток магматических газов в Мутновский геотермальный резервуар по данным наблюдений P_{CO_2} на конденсаторе ГеоЭС в 2019–2020 гг.	66

РАЗДЕЛ IV. МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

<i>Лемзиков М.В., Кирюхин А.В.</i> Анализ магматической активности Ключевского вулкана перед латеральным извержением 2021 года с использованием программы Frac-Digger	71
<i>Алексей Котов, Сергей Смирнов, Нориёси Цучия и Масаоки Уно</i> Поведение летучих компонентов в магматической системе вулкана Менделеева (остров Кунашир)	75
<i>Воропаев С.А., Севастьянов В.С., Душенко Н.В., Федулов В.С.</i> Изотопия углерода как индикатор условий взаимодействия флюид-магма	80
<i>Пузанков М. Ю., Кирюхин А.В., Иванов А.В.</i> Подводящие дайки системы вулкана Корякского (Камчатка)	83
<i>Малик Н.А., Округин В.М., Лукашевская И.Д.</i> Динамика температуры и состава газа фумарол Авачинского вулкана в 2013–начале 2021 гг.	87
<i>Черных Е.В.</i> Магматический фрекинг под Авачинским вулканом в период с 2000 по август 2021 гг.	91

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

<i>Гордиенко В.В.</i> Тепловая модель вулкана Авача	96
<i>Гордиенко В.В., Гордиенко И.В.</i> Тепловые модели рудных зон	100
<i>Сук Н.И., Котельников А.Р.</i> Явления силикатно-карбонатной и силикат-силикатной несмесимости во флюидно-магматических системах (эксперимент)	105
<i>Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А.</i> Флюидно-магматические системы в режиме декомпрессии и процессы вулканизма	109
<i>Лаврентьев М.М., Марчук А.Г., Облаухов К.К., Романенко А.А.</i> Быстрое численное моделирование на базе персонального компьютера.....	113
<i>Шулюпин А.Н., Любин А.А., Чернев И.И.</i> Оценка эффективности скважины при парлифтовой добычи теплоносителя на Мутновском месторождении (Камчатка) при разработке глубинных горизонтов	118

РАЗДЕЛ VI. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ

<i>Болдушевская Л. Н.</i> Вулканогенные породы нижнего триаса Енисей-Хатангского регионального прогиба и прилегающих территорий: проявления гидротермальных процессов, источники битумов	127
<i>Лямина Л.А., Харитонова Н.А.</i> Изотопы гелия в источниках Камчатки	131
<i>Байрамова А.С.</i> Применение схемы двойной пористости для анализа истории эксплуатации водно-метанового месторождения	135
<i>Коровина Т.А., Романов Е.А., Кропотова Е.П.</i> Роль тектоники и глубинной флюидодинамики в формировании нефтегазопродуктивных отложений верхнепалеозойского и юрского комплексов Западной Сибири	138
<i>Воронин П.О., Кирюхин А.В.</i> Термогидродинамическое моделирование условий формирования ГТС в ЮЗЗ секторе Корякского вулкана	142
<i>Делемень И.Ф.</i> Некоторые методологические аспекты наращивания ресурсного потенциала углеводородов на Камчатке.....	148

РАЗДЕЛ VII. МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ И КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Карпов Г.А.

Гейзеры кальдеры Академии Наук (Камчатка): местоположение, морфология выходов, механизм и динамика извержений, эволюция состава терм 153

Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б., Рычкова Т.В., Карташова Е.В., Назарова М.А.

Изменения минерального и элементного состава гейзеритовых отложений за период 2018–2021 гг. 158

Усачева О.О.

TOUGH2-EOS1 моделирование влияния инфильтрации в двухфазный Гейзерный резервуар на динамику естественной разгрузки гидротерм..... 161

Рычкова Т.В.

Цикличность извержений гейзера Большого в 2020–2021 гг. 165

CHAPTER I. HYDROTHERMAL SYSTEMS OF VOLCANIC AREAS

РАЗДЕЛ I. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

УДК 553.7

Geothermal deposits of the Paratunsky depression – Paratunskoye and Verkhne-Paratunskoye

Larisa Vorozheikina

*JSC «Heat of the Earth»
tz41@tz41.ru*

Two large geothermal thermal water fields – Paratunsky and Upper-Paratunsky, belonging to the group of nitrogen alkaline therms, with total reserves ~570 l/sec are explored in the Paratunka river graben valley. The Paratunsky field has been in operation since 1964 and is operated in the combined mode with the use of submersible pumps. This field is considered the most explored in Kamchatka and is developed down to a depth of 1500 meters. The total production of thermal water does not exceed 250 l/s. According to the conclusion of the State Commission on Mineral Reserves (2003), «the resources of the Paratunsky field are limited» – indeed, drilling new wells and deepening them to 2500 meters did not lead to an increase in the amount of reserves. To study the possibility of using the Paratunsky field for heat supply in Kamchatka, it was proposed to increase thermal water production at the field to 1375 l/s by stimulation of natural fractures – based on the experience of the Upper Rhine graben (Kiryukhin, Zhuravlev, 2018). Both fields, Paratunsky and Upper-Paratunsky, are united by the paleocaldera structure of the Paratunsky depression identified by previous researchers. Since the resources of both fields are shared and the fractures are deep penetrating, the interaction of these fields is expected. Probably, we should not rush to increase the production of natural heat at the Paratunsky field, at least until a common conceptual model of both fields is created, especially as it concerns the conceived prospective project «The Three Volcanoes» at the expense of the Upper-Paratunsky field's thermals.

Keywords: resources, geothermal fields, wells, hydrotherms, caldera

Геотермальные месторождения Паратунской депрессии – Паратунское и Верхне-Паратунское

Л.А. Ворожейкина

Акционерное общество «Тепло Земли», п. Термальный, 684035

В грабенообразной долине р. Паратунки разведаны два крупных геотермальных месторождения термальных вод – Паратунское и Верхне-Паратунское, принадлежащих к группе азотных щелочных терм, с общими запасами ~570 л/с. Паратунское месторождение, находится в эксплуатации с 1964 г., – режим эксплуатации комбинированный, с применением погружных насосов. Считается наиболее изученным на Камчатке, освоено до глубины 1500 м. Общая добыча природного теплоносителя не превышает 250 л/с. По заключению экспертной комиссии ГКЗ (2003 г.) «ресурсы Паратунского месторождения ограничены», – действительно, бурение новых скважин, углубление их до 2500 м не привели к приросту запасов. С целью изучения возможности использования Паратунского месторождения для теплоснабжения Камчатки предложено увеличить добычу термальных вод на месторождении до 1375 л/с путем стимуляции природных трещин – по опыту Верхне-Рейнского грабена (Кирюхин, Журавлёв, 2018). Оба месторождения, Паратунское и Верхне-Паратунское, объединяет палеокальдерная структура Паратунской депрессии, выделенная предшественниками. В виду того, что ресурсы обоих месторождений общие, трещины глубоко проникающие, ожидается взаимодействие этих месторождений. Вероятно, нужно повременить с увеличением добычи природного теплоносителя на Паратунском месторождении, по крайней мере, до создания общей концептуальной модели обоих месторождений, тем более что это касается задуманного перспективного проекта «Три вулкана» за счёт терм Верхне-Паратунского месторождения.

Ключевые слова: ресурсы, месторождения, скважины, гидротермы, кальдера

В грабенообразной долине р. Паратунки разведаны два крупных месторождения термальных вод – Паратунское и Верхне-Паратунское, принадлежащих к группе азотных щелочных терм, с разведанными общими запасами ~570 л/с (Рис. 1).



Рисунок 1 – Орогидрографическая схема района работ

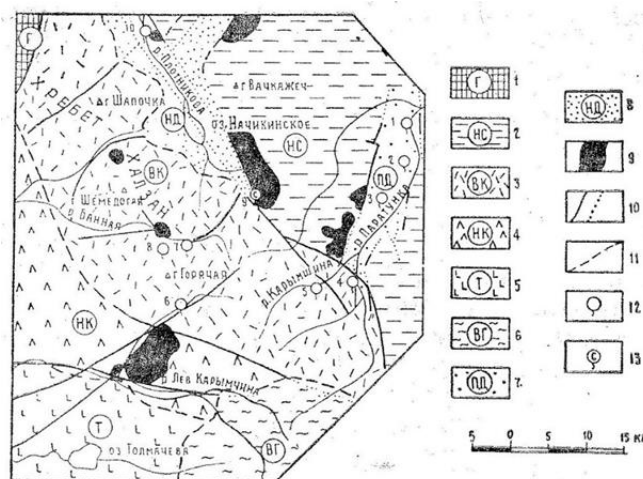
Чёрной жирной линией на схеме показаны границы горных отводов Паратунского (севернее) и Верхне-Паратунского месторождений теплоэнергетических вод

Паратунское месторождение находится в эксплуатации с 1964 г. – режим эксплуатации комбинированный – наряду с фонтанным способом применяются погружные насосы; месторождение считается наиболее изученным на Камчатке, освоено до глубины 1500 м (суммарный водоотбор порядка 250 л/с). Верхне-Паратунское месторождение вводится в эксплуатацию фрагментарно с 1981 г. – с момента защиты запасов термальных вод в ГКЗ.

С 1994 г. на Камчатке изучается проблема теплоснабжения Камчатки за счёт геотермальных ресурсов – в последние годы внимание привлекло Паратунское месторождение, ввиду его близости к областному центру. По сообщению А.В. Кирюхина, Н.Б. Журавлёва (2018 г.) есть возможность устойчивой эксплуатации Паратунского геотермального резервуара при расходе 1375 кг/с, по примеру Верхне-Рейнского опыта, основанного на идее стимуляции природной системы трещин и их последующей эксплуатации с использованием скважинных насосов LSP. В данном случае предполагается стимуляция природной системы трещин в вулканически активном регионе – само намерение относительно Камчатки спорное.

С другой стороны, повышенный интерес возник к соседнему Верхне-Паратунскому месторождению ввиду задуманного проекта «Три вулкана». Территориально разведанное Верхне-Паратунское месторождение является «воротами» к многочисленным туристическим тропам Южной Камчатки – отсюда появление заинтересованной группы людей и последующие их активные действия относительно Верхне-Паратунского месторождения. Существует понимание, что ресурсы обоих месторождений тесно взаимосвязаны – их объединила общая Паратунская депрессия-палеокальдера. Практически взаимодействие скважин обоих месторождений пока не изучено, но весьма ожидаемо, в том числе по причине наличия открытых трещин рифтовой зоны хребта Тополового. Наиболее полная комплексная геолого-гидрогеологическая характеристика района Паратунского, Верхне-Паратунского месторождений приведена ранее в кн. «Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. 1976».

По результатам мониторинга скважин Паратунского месторождения экспертной комиссией ГКЗ (Протокол № 874 от 2003) сделано однозначное заключение, что «ресурсы Паратунского месторождения ограничены». В процессе подготовки нового отчёта по Паратунскому месторождению (2020 г.) предпринята попытка разобраться в причине малых ресурсов. К проблеме подошли, опираясь на основные структуры Паратунского геотермального района (Манухин, Сугробов, 1980). Согласно схеме районирования Камчатки рассматриваемый геотермальный район относится к юго-восточной окраине внутренней вулканической дуги полуострова, представляющей собой сложно-построенный Южно-Камчатский антиклинорий (Власов, 1972). Наиболее крупные структуры района представлены на геолого-тектонической схеме предшественников (Рис. 2).



- 1 – Метаморфическая зона Ганальского хребта;
 - 2 – Начикинская складчато-глыбовая зона;
 - 3 – Верхнекарымчинская вулканическая зона;
 - 4 – Нижнекарымчинская вулканическая зона;
 - 5 – Толмачевская область аресального 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

Рисунок 2 – Геолого-тектоническая схема Паратунского геотермального района (по материалам авторов С.Е. Апрелькова, В.М. Бондаренко, Ю.А. Краевого, Ю.Ф. Манухина, В.Г. Охупкина)

Паратунская депрессия

На рис. 2 выделена Паратунская депрессия, представляющая собой грабенообразную структуру СВ ориентировки, ограниченную крупными дуговыми разломами рек Паратунка, Левая Быстрая; она вмещает группу термальных источников, наиболее известные из них: Паратунские – Северные, Нижние, Средние, Верхние, а также Поперечные и Карымшинские. Что касается структуры известного «горячего» Паратунского грабена (как части Паратунской депрессии), то в устье р. Лев. Быстрой он резко меняет СВ направление на восточное, устремившись к седловине вулканов Авачинский, Корякский. Южная граница Паратунской депрессии проходит южнее соп. Горячей, в виде смыкающихся дуговых разломов, северная граница прослежена на широте устья р. Лев. Быстрой (Костенко, 1995).

Верхне-Карымчинская вулканическая зона граничит с Паратунской депрессией на юге, представляет собой протяженную полосу СЗ ориентировки, на площади которой распространены кислые и умеренно-кислые вулканы (условия залегания разнообразны). Весьма специфичной чертой этой зоны является широкое распространение игнимбритов, часть которых связана кальдерообразованием. Предполагается, что, по аналогии с этой территорией, процесс кальдерообразования затронул и Паратунскую депрессию, вдоль западной границы которой вырос (и продолжает расти) хребт Тополовый и горст Тополовый, разделившие грабенообразные долины рек Паратунка, Левая Быстрая (в прошлом обе долины объединяла обширная Паратунско-Левобыстринская депрессия, по результатам специального геоморфологического анализа (Костенко, 1995)). Продолжающийся рост хребта Тополового сопровождается процессом рифтогенеза, появлением трансформных сдвиговых зон разломов, Паратунско-Банных субширотных трансформных разломов, отчетливо видных на водоразделе хребта по не зарастающим участкам леса. По симметрично расположенным относительно хр. Тополового дуговым разломам трассируются русла рек Паратунки и Лев. Быстрой, очерчивая границы Паратунской депрессии. Оба дуговых разлома открыты к хр. Тополовому. Дуговой разлом р. Паратунки очерчивает её русло и продуктивную наиболее заболоченную площадь Паратунского месторождения (Рис. 3).

Симметрично Паратунскому расположен дуговой разлом р. Лев. Быстрой в комплексе с субвертикальной дайкой СЗ ориентировки – фрагмента геофизической аномалии (круто восходящей зоны разуплотнения, обнаруженной у руч. Хайкова (Сидоров, 1995). Наличие рудной аномалии на склоне хр. Тополового также подтверждает его возможную связь с глубинами (Серёжников, 2000 г.). Геодинамические особенности хр. Тополового отражены на соответствующей схеме (Рундквист, 1991) (Рис. 4).

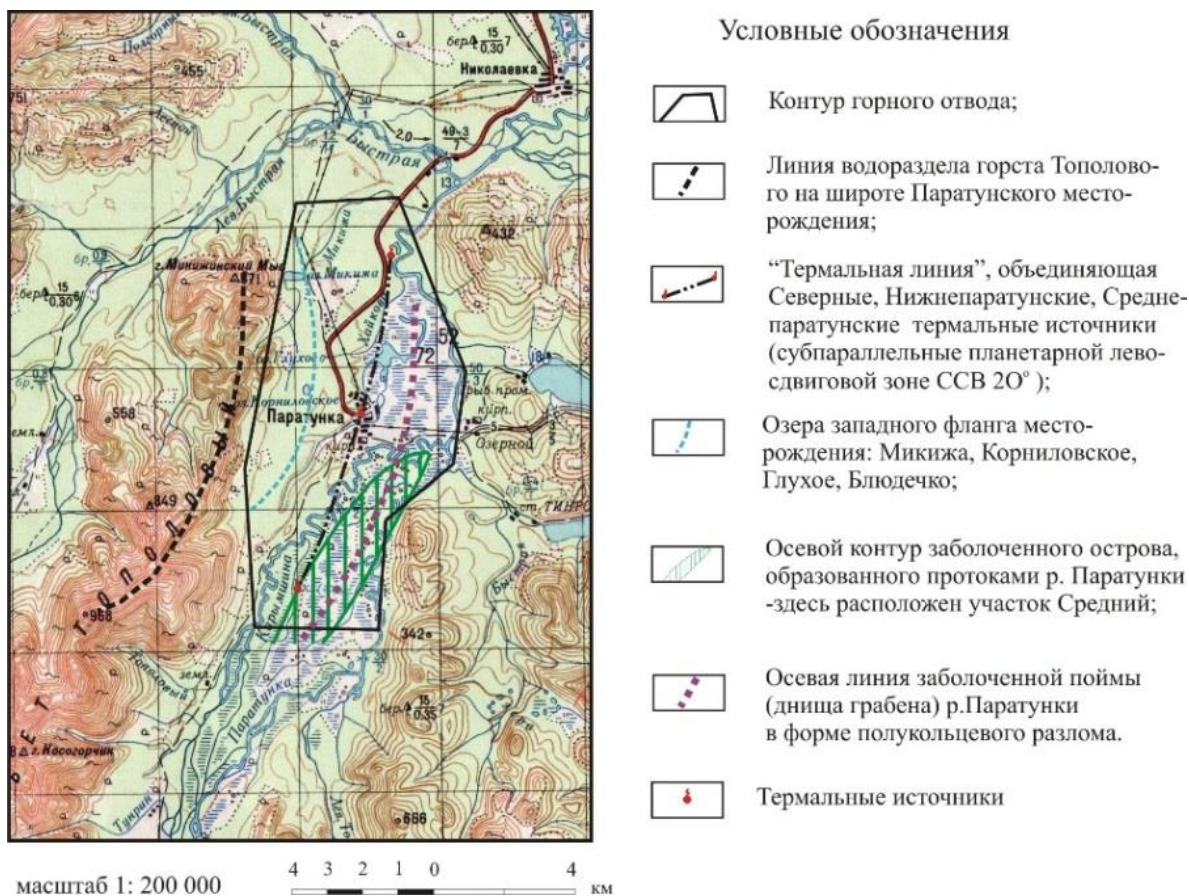


Рисунок 3 – Некоторые элементы структурного контроля Паратунского месторождения термальных вод



Рисунок 4 – Палео- и современные геодинамические системы Авачинско-Плотниковского сегмента по результатам дешифрирования КС масштаба 1:1000000 – по И.К. Рундквист, 1991 г.

Центральный разлом-рифт Паратунского месторождения (характеризуется разнонаправленным подвигом) разделяет площадь месторождения на западную и восточную части, характеризующиеся сбалансированным энергообменом. К примеру, стоило превысить водоотбор в восточной части месторождения, как последовали процессы, направленные на выравнивание энергообмена. Скважины западной его части явно «предпринимали усилия» для восполнения энергоресурсов на востоке, задействован был и термометаморфизм – появилось CO_2 в химическом составе теплоносителя. В течение примерно года баланс восстановился (Рис. 5)

Обращает внимание, что большинство аномалий Паратунского месторождения соотносится с Нижним участком: скрытый вулканизм, максимальная и эталонная температура, тектонические и гидрохимические особенности, общность качественной характеристики с термами Больше-Банного месторождения, даже зарастание керна скважины кальцитом (скв. РЭ-6 Нижнего участка Паратунского месторождения); есть косвенные предпосылки встретить на глубине перегретые воды, близкие по качественной характеристике к некоторым скважинам Больше-Банного месторождения, запасы которого отнесены к забалансовым, ввиду зарастания скважин кальцитом. Структурно Паратунское и Больше-Банное месторождения объединяют трансформные Паратунско-Банские субширотные разломы, теряющиеся в океане и способствующие формированию контура полуострова; по данным вулканологов с ними связаны – глубокофокусные эпицентры землетрясений (≥ 100 км).

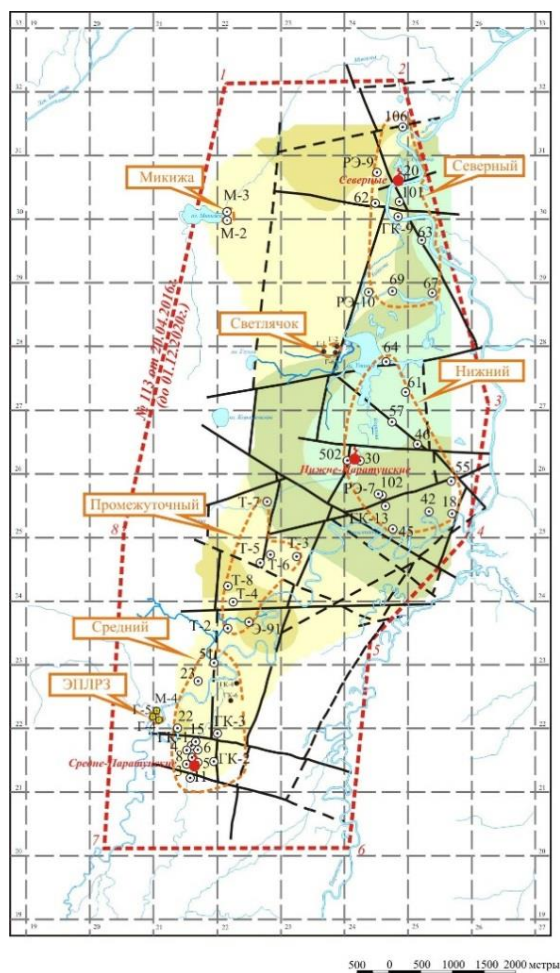


Рисунок 5 – Схема расположения участков и сложившихся термоводозаборов Паратунского месторождения

Условные обозначения

- Хлоридно-сульфатные натриево-кальциевые
- Хлоридно-сульфатные кальциево-натриевые
- Сульфатные натриево-кальциевые, натриевые
- Сульфатные кальциево-натриевые
- а)
б)
 - тектонические нарушения а) установленные б) предполагаемые
- Скважины:
- 20 - добычные
- источники
- граница сложившегося термоводозабора
- граница горного отвода

Паратунское месторождение трещинно-жильных термальных вод отнесено к сложнейшей 4-ой группе, и его сюрпризы возможны. Уже напрашивается необходимость при моделировании (Кириухин и др. 2017, Kiryukhin et al. 2017) учесть наличие Паратунской депрессии, возможность теплового питания со стороны хр. Тополового, возможность формирования Паратунского и Верхне-Паратунского месторождений, как и других геотермальных объектов Камчатки, одновременно с периодом последней активизации

вулканизма на Камчатке в голоцене, предположительно, у восточной окраины гигантской Карымшинской (Рис. 6) впадины супервулкана в результате термометаморфизма (Леонов, Рогозин, 2007).

По всей вероятности, с предложением о повторении Верхне-Рейнского эксперимента на Паратунском месторождении, тесно связанным с Верхне-Паратунским, торопиться не надо, пока не будет составлена их общая концептуальная модель. Тем более что рядом, вдоль подножия Восточно-Камчатского вулканического пояса, на протяженности 500 км проходит открытая трещинная зона (Поляк и др., 1965), похожая на вновь формирующийся трещинный линейный вулкан, типа Толбачинского, – но по соседству с городом.

По результатам съемочных работ в голоцене преобладали разломы диагонального направления (Федоренко, 1968). Геолого-геодинамическим анализом установлено, что: СЗ зоны разломов являются термоподводящими, что соответствует осевой линии Тихоокеанского огненного кольца; СВ – термовмещающими (Соколов, 1995). На пересечении диагональных разломов, по соседству с субшротным, в Авачинской губе выявлен узел сейсмогенной активности (Дмитриев, Ежов, 1977), с которым соотносится аномалия тяжелых металлов, вулкан Хлебалкина у г. Вилючинска.

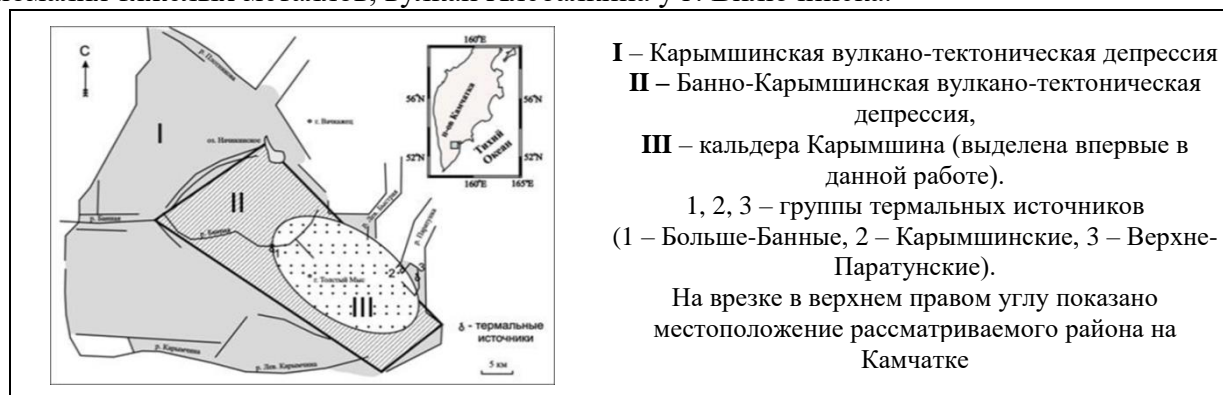


Рисунок 6 – Местоположение кальдеры Карымшина и ее сопоставление с вулcano-тектоническими депрессиями, выделявшимися в данном районе ранее

В заключение напомним, что Камчатка всегда считалась полевой лабораторией планеты Земля, а Паратунское месторождение, как никакое другое – лучший объект для создания планетарного научного центра, притягательного для исследователей, на границе суши и океана.

Итоги

1. Ограниченная ёмкость, сложность строения Паратунской кальдерной депрессии определили соответствующие ресурсы Паратунского, Верхне-Паратунского месторождений. Отсюда напрашивается необходимость создания общей концептуальной модели месторождений Паратунской депрессии.

2. Многочисленные риолитовые экструзии на границе кальдеры Карымшина указывают на благоприятные предпосылки к проявлению посткальдерного вулканизма в голоцене – в период общей активизации вулканизма на Камчатке, формирования её геотермальных объектов.

3. Продолжающийся рост хребта Тополового связан с активизацией его глубин и это может способствовать поступлению глубинного теплоносителя.

4. Анализ гидрохимических данных позволил предположить, что в глубинах Паратунского месторождения могут быть встречены воды типа Больше-Баннных. Сплошное зарастание термоподводящих трещин встречено по керну скв. РЭ-6 (Нижний участок).

5. Паратунское месторождение Центральным разломом – рифтом, разделено на две части, имеющие сбалансированный энергообмен.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Том XXIX. Камчатка, Курильские и Командорские острова. М.: «Недра». 1972. 364 с.
2. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки / ред. В.М. Сугробов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1976. 284 с.
3. Дмитриев В.Д. К вопросу о происхождении Авачинской губы. / В.Д. Дмитриев, Б.В. Ежов // Вопросы географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 1977. Вып. 7. С. 45–48.
4. Кирюхин А.В. Возможности использования Паратунского геотермального месторождения для теплообеспечения Камчатки. / А. В. Кирюхин, Н. Б. Журавлев // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 21–33.
5. Леонов В.Л. Карымшина – гигантская кальдера-супервулкан на Камчатке: границы, строение, объём пирокластики. / В. Л. Леонов, А. Н. Rogozin // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 14–28.
6. Поляк Б.Г. Гидрогеотермические условия вулканического района Камчатки (г. Петропавловск) / Б. Г. Поляк, Е. А. Вакин, Е. Н. Овчинникова, ред. В.В. Аверьев. М.: Наука, 1965. 94 с.
7. Ворожейкина Л.А. Опыт-методическая работа по применению геологоструктурных, гидрогеологических, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях: отчёт Авачинской партии «Камчатгеологии» о результатах работ, проведенных на Петропавловской площади. / Л.А. Ворожейкина, В. А. Соколов, М. Д. Сидоров и др. п. Термальный, 1995.
8. Отчёт по теме: «Прогнозная оценка геотермальных ресурсов Камчатской области» по работам 1977–1980 гг.
9. Пащенко Л.Г. Отчёт о результатах детальной разведки Северного, Нижнего и Среднего участков Паратунского месторождения термальных вод, проведенной Паратунской геологоразведочной партией в 1964–1968 гг. для целей теплофикации (с подсчётом эксплуатационных запасов по состоянию на 25 ноября 1968 г.). / Л.Г. Пащенко др. п. Термальный, 1968. П-К. ТФГИ ДВФО. инв. № 2586.
10. Рундквист И.К. Отчёт по договору №91 / 104. Составление геодинамической карты на основе космических снимков на лист №-57-XXVII. / И.К. Рундквист, З.Б. Декусар и др. Санкт-Петербург, 1991.
11. Серёжников А.И. Отчёт о результатах гидрогеологического доизучения с инженерно-геологическими, геоэкологическими исследованиями и картографированием масштаба 1:200000, проведенного на территории листа №-57-XXVII в 1991–1996 гг. / А.И. Серёжников, В. А. Лазарев и др. Елизово, 2000.
12. Кирюхин А.В. Условия формирования и моделирование эксплуатации Паратунского геотермального месторождения (Камчатка) / Н.П. Асаулова, Л.А. Ворожейкина и др. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. № 3. С. 16–30.
13. Kiryukhin A.V. Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia / L.A. Vorozheikina, P.O. Voronin, P.A. Kiryukhin // Geothermics. 2017. Vol. 70. P. 47–61.

TOUGH2-modeling of the water recharge conditions for the Upper-Paratunskiy geothermal field

Nikita Zhuravlev

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

A TOUGH2 model of the water supply process for the Upper-Paratunsky geothermal reservoir was assembled using the TOUGH2 software package and PetraSim graphic preprocessor.

Keywords: hydrogeology, Paratunsky geothermal field, Leonov caldera, water supply, TOUGH2

TOUGH2-моделирование условий водного питания Верхне-Паратунского геотермального месторождения

Н.Б. Журавлев

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Проведено моделирование условий водного питания и собрана модель естественного состояния продуктивного резервуара Верхне-Паратунского геотермального месторождения с применением программного комплекса TOUGH2 и графического препроцессора PetraSim.

Ключевые слова: гидрогеология, Верхне-Паратунское геотермальное месторождение, кальдера Леонова, водное питание, TOUGH2

Верхне-Паратунская гидротермальная система относится к низкотемпературной гидротермальной системе и расположена в южной части Камчатки. Площадь месторождения составляет примерно 30 км². Все 45 скважин в пределах месторождения вскрыли термальные воды различные по температуре и химсоставу. Мощность водоупорной толщи (до появления самоизлива из скважины) составляет 24–423 м, преимущественно 100–350 м. Нижняя граница выделенной толщи залегает на глубине 64–586 м. Обводненные трещинные зоны вскрывались скважинами на различных глубинах от 32–101 м до 1670 м. Зоны водопритоков разделены между собой необводненными интервалами мощностью от десятков до первых сотен метров (Манухин, Ворожейкина, 1976). В целом на ВП ГТС до глубины 400 м, реже 600 м и более, наблюдается низкая проницаемость трещинных зон. Максимум прироста дебита большинства скважин отмечен в интервале 400–1000 м. Проницаемые обводненные зоны встречаются только в тектонически ослабленных зонах. Верхняя зона годовых теплооборотов распространяется до глубин 23 м. Снижение T с глубиной, также как и на изливе, связано с уменьшением интенсивности циркуляции гидротерм вследствие уменьшения их производительности. Грунтовые воды, несмотря на интенсивный водообмен и низкую температуру (3–5 °C), не оказывают охлаждающего влияния на термальные воды, циркулирующие под водоупором (Кузьмин, Руленко, 2019).

Рассматриваемый район расположен в южной части полуострова Камчатка, примерно в 50 км на юго-запад от г. Петропавловск-Камчатский. Он представляет собой горный массив с отдельными вершинами высотой до 1200–1300 м (Рис. 1). Наиболее высокой является гора Толстый Мыс (1343 м). Со склонов этой горы и ближайших вершин берут начало многие реки района, текущие как на восток, в сторону Тихого океана (реки Паратунка, Лев. Быстрая), так и на запад – к Охотскому морю (реки Банная, Карымчина) (Леонов, Рогозин, 2007).

В настоящее время существующие скважины могут суммарно обеспечить 270 л/с воды с температурой 84 °C, при избыточном напоре не менее 15 м (Kiryukhin et al, 2017).

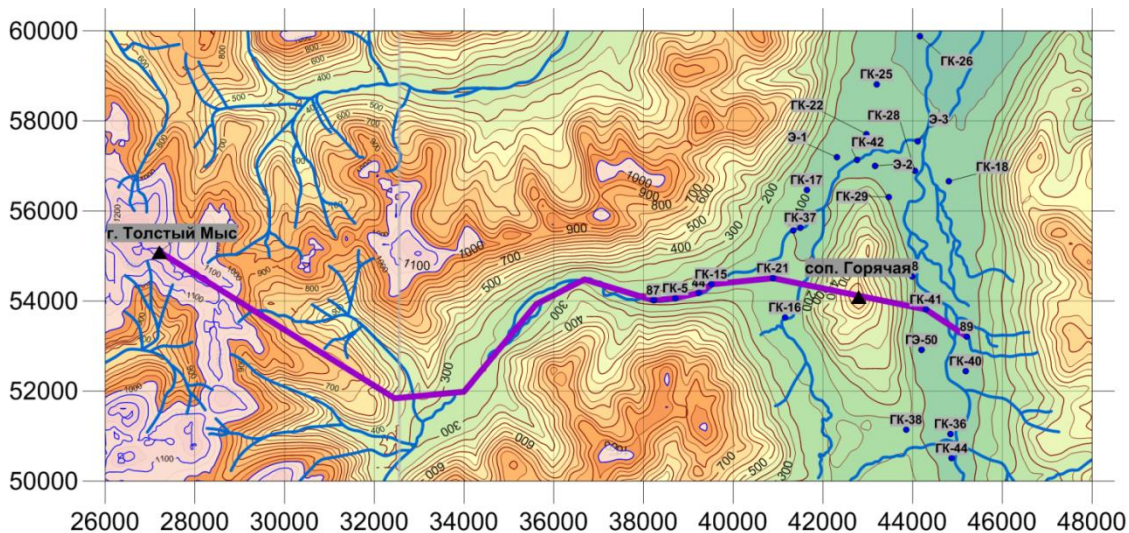


Рисунок 1 – Геофильтрационная и геотермическая структура, условия водного питания и граничные условия Верхне-Паратунского геотермального месторождения

Исходя из результатов анализов изотопного состава воды, область водного питания Верхне-Паратунского геотермального месторождения приподнята до отметок ледников и многолетних снежников. Локальные приводораздельные области кальдеры Леонова в верховьях р. Карымшина, являются наиболее вероятными областями водного питания Верхне-Паратунского геотермального месторождения (Воронин, 2019).

Структуры северо-восточного сектора кальдеры Леонова и в верхнем течении р. Карымшина могут вмещать высокопроницаемые каналы, по которым холодная вода тающих ледников и снежников проникает в разломы фундамента на глубины 1,5–2 км и, прогреваясь на протяжении 15–20 км за счет съема тепла вмещающих горных пород и кондуктивного теплового потока, приходит уже в виде ~75 °С воды в Верхне-Паратунский продуктивный геотермальный резервуар (Рис. 2). Площадь рассматриваемой области водного питания с отметками выше +900 м абс. составляет 15 км², из которых значительную часть занимают многолетние снежники и ледники, которые при годовой величине атмосферных осадков более 5000 мм могут обеспечить сток воды с расходом более 2 м³/с. Если 15 % от этого стока преобразуется в подземный сток, то этого достаточно для обеспечения водного питания Верхне-Паратунского геотермального месторождения. Приподнятое положение области водного питания обеспечивает повышенное гидродинамическое давление (+100...+200 бар), гидроразрыв, раскрытие и реактивацию сдвиговых трещин и разломов, повышение проницаемости по пути фильтрации.

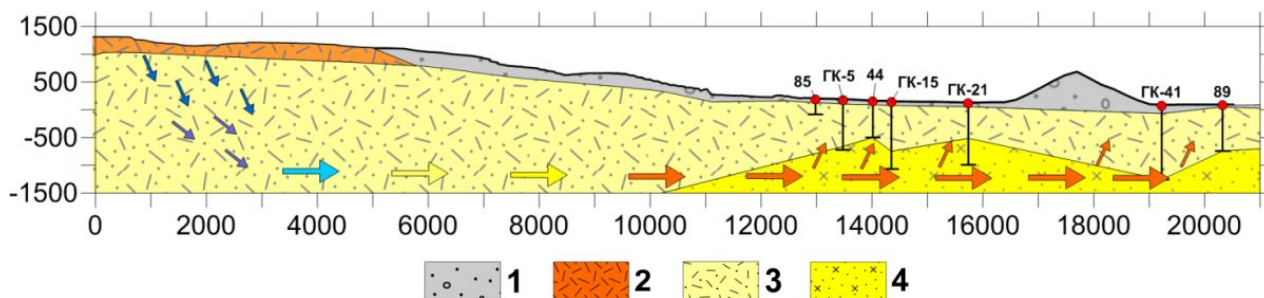


Рисунок 2 – Концептуальная модель водного питания Верхне-Паратунского месторождения.
 1 – аллювиальные гравийно-галечные отложения; 2 – игнимбриты, кристаллокластические туфы;
 3 – туфы кислого и смешанного состава, андезито-базальты;
 4 – андезиты, аргиллиты, базальты. Стрелками указаны пути фильтрации

Для описания теплопереноса в гидротермальных системах эффективным инструментом является программа моделирования потоков многофазных флюидов и потоков тепла в пористой и трещиноватой среде – TOUGH2. Для графической визуализации результатов математического моделирования совместно используется препроцессор

PetraSim. При его помощи и исходя из концептуальной модели системы Кальдера леонова – Верхне-Паратунское геотермальное месторождение было осуществлено построение профильной математической модели процесса водного питания геотермального резервуара (Рис. 3).

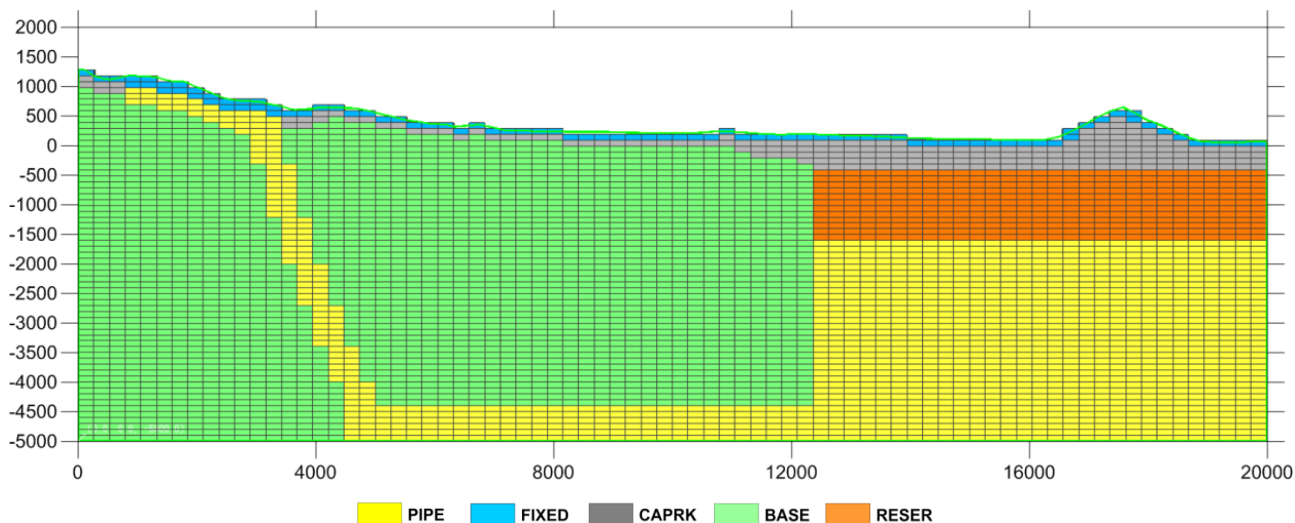


Рисунок 3 – Зонирование модели на домены с различными материальными свойствами. Условные обозначения:
 PIPE – проницаемые структуры, по которым происходит водное питание;
 FIXED – зона с фиксированным состоянием окружающей среды (температурой и давлением);
 CAPRK – водоупор; BASE – вмещающие породы, низкопроницаемые;
 RESER – проницаемый продуктивный резервуар Паратунского месторождения

Модель включает водосборные площади восточной окраины кальдеры Леонова и верхнего течения р. Карымшина и продуктивный резервуар Верхне-Паратунского месторождения по линии разреза от г. Толстый Мыс до сопки Горячей. Область моделирования по оси Z от 1300 м до –5000 м, по оси X от 0 до 20000 м, по оси Y от 0 до 100 м, число элементов модели – 4108. На рис. 3 показано зонирование модели, где в каждой из зон задаются различные значения, проницаемости, пористости, плотности, теплопроводности. Значения петрофизических свойств доменов представлены в табл. 1. В верхней части домена PIPE задано поступление флюида (воды) 270 кг/с. Верхней границе модели присвоено фиксированное состояние, соответствующее атмосферным условиям ($T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1\text{ бар}$). В нижних ячейках модели заданы значения теплового потока 60 мВт/м^2 .

Таблица 1. Материальные свойства доменов модели

Характеристики	Домены			
	PIPE	BASE	RESER	CAPRK
Плотность, кг/м ³	2300	2700	2300	2700
Пористость	0,1	0,1	0,1	0,2
Проницаемость, м ²	5×10^{-14}	10^{-16}	10^{-12}	10^{-17}
Теплопроводность, Вт/м °С	2,1	1,4	2,1	2,1
Теплоемкость, Дж/кг °С	1000	1000	1000	1000
Сжимаемость, Па ⁻¹	10^{-8}	10^{-8}	$4,1 \times 10^{-8}$	10^{-8}

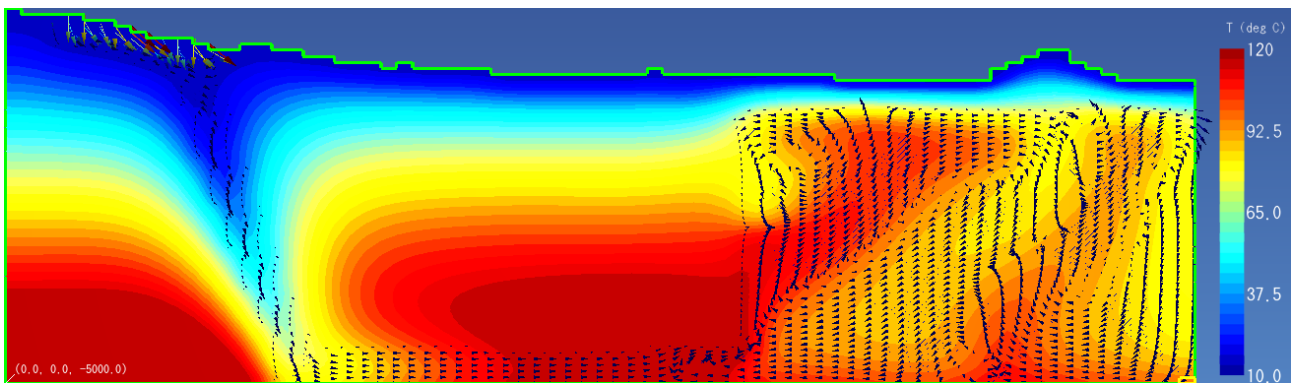


Рисунок 4 – Результаты TOUGH2 моделирования условий водного питания Верхне-Паратунского геотермального месторождения. Векторами на разрезе показаны направления потоков теплоносителя. Цветом показано распределение температуры

Прогон модели выполнялся на период 50 тыс. лет. В результате моделирования показано, что вода поступает через проницаемую зону кальдеры Леонова на отметки –4500...–5000 м, где нагревается под действием тепловых источников и движется к продуктивному резервуару, формируя конвективные ячейки в нём (Рис. 4). Получен профильный разрез модели, на котором показано распределение температур. Изолинии максимальных температур вытянуты в направлении движения потоков теплоносителя в геотермальном резервуаре.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ_а «Магматический фрактинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА-А20-120121090010-7.

Список литературы

1. Леонов В.Л. Карымшина – гигантская кальдера-супервулкан на Камчатке: границы, строение, объем пирокластики / В. Л. Леонов, А. Н. Rogozin // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 14–28.
2. Манухин Ю. Ф. Гидрогеология Паратунской гидротермальной системы и условия её формирования / Ю. Ф. Манухин, Л. А. Ворожейкина // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. – с. 143-178.
3. Кузьмин Ю. Д. Термодинамический и газовый мониторинг Верхне-Паратунской гидротермальной системы с целью изучения ее отклика на внешние воздействия Ю.Д. Кузьмин, О.П. Руленко. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции 29 сентября – 5 октября 2019 г./ <http://emsd.ru/conf2019lib/mlib4.html>.
4. Воронин П.О. Анализ результатов определений изотопного состава воды скважин Паратунского геотермального месторождения за период 2014–2018 гг. / П.О. Воронин // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2019), 4–9 сентября 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 90–94.
5. Kiryukhin, A.V. Thermal and permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs in Kamchatka, Russia / A.V. Kiryukhin, L.A. Vorozheikina, P.O. Voronin, P.A. Kiryukhin // Geothermics. 2017. pp. 47–61.

The material composition of the rocks in the steaming zones of the Mutnovsky geothermal field (South Kamchatka)

Olesya Zoben'ko¹, Viktor Okrugin¹, Ivan Chernev²

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
zobenko.olesya@yandex.ru*

²*PJSC «Kamchatskenergo», Petropavlovsk-Kamchatsky, st. Academician Korolev, 60, 683000*

Presents the results of a study of the mineralogical and geochemical features of volcanics along the section of one of the wells of the Mutnovsky steam-hydrotherm field.

Keywords: Mutnovsky geothermal field, Mutnovskaya GeoPP, hydrothermally altered rocks, ore mineralization

Вещественный состав пород зон пропаривания Мутновского геотермального месторождения (Южная Камчатка)

О.А. Зобенько¹, В.М. Округин¹, И.И. Чернев²

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

²*ПАО «Камчатскэнерго», г. Петропавловск-Камчатский, ул. Академика Королёва, 60*

Представлены результаты исследования минералого-геохимических особенностей вулканитов по разрезу одной из скважин Мутновского месторождения парогидротерм.

Ключевые слова: Мутновское геотермальное месторождение, ГеоЭС, гидротермально измененные породы, рудная минерализация

Мутновская высокотемпературная геотермальная система – одна из крупнейших на Камчатке. Она включает в себя одноименное месторождение парогидротерм. Его площадь составляет 80 км², сложено оно вулканогенными и вулканогенно-осадочными отложениями олигоцен-четвертичного возраста (Геотермические..., 1986; Округин, 2006).

В работе приведены данные исследования вещественного состава пород по разрезу скважины Гео-1Б в интервале глубин от 18 до 1220 м. Скважиной вскрыты субвулканическое тело силлообразной формы (плиоцен), вулканиты нижнеасачинской (средний миоцен), нижнеалнейской (верхний миоцен-плиоцен) и верхнеалнейской (плиоцен) свит, перекрытые четвертичными отложениями. Породы представлены:

- четвертичными андезитами и андезибазальтами; андезитами, андезибазальтами, базальтами, их туфами (верхнеалнейская толща);
- игнимбритами, туфами риолитов и дацитов (нижнеалнейская толща);
- андезибазальтами, базальтами, их туфами (нижнеасачинская подсвита); андезибазальтами и андезитами силла.

Четвертичные андезиты и андезибазальты (до глубины 96 м) имеют следы гидротермальных изменений – содержания Zr, Ba, Sr, являющихся элементами вторичных минералов достигает 500 ppm. Значительными вариациями по разрезу скважины отличается концентрация СаО. Кальций входит в состав вторичных минералов от карбонатов до цеолитов, которые распространены в зонах гидротермальных изменений, связанных с действием современных гидротермальных растворов. Кроме того карбонаты образуются при процессах региональной пропилитизации, которая приводит к преобразованию первичных породобразующих силикатов (плаггиоклазы, пироксены).

Эффузивы верхнеалнейской толщи (136–735 м) в равной степени ложатся в область нормальных и умеренно-щелочных разностей. Для первых отмечается высокое содержание Sr (450–500 ppm), для вторых – значительные концентрации Ba (1580 ppm). Данный интервал

отличается максимальными по всему разрезу скважины содержаниями Al_2O_3 (17–19 %), CaO (8–10 %) и MgO (4–5 %). Породы содержат кварц, средние плагиоклазы, гиперстен. Акцессорные минералы представлены кальцитом, сфеном (F 1,76 вес. %), баритом, апатитом (F 3,7 вес. %; Cl 1 вес. %). Отмечается хлоритизация пород. Рудная минерализация убого-вкрапленная представлена магнетитом, титаномагнетитом, ильменитом и халькозином (Рис. 1а, б).

Более кислые эффузивы нижнеалнейской толщи (799–917 м) характеризуются максимальными по разрезу содержаниями K_2O_3 (3,5–4 вес. %). Высокая концентрация Ва (до 3550 ppm) в породах объяснима наличием собственных минералов (барит) и примесью в калиевых полевых шпатах (до 3,5 вес. %). Породы отличаются значительным количеством и разнообразием рудных минералов. Помимо магнетита и титаномагнетита диагностированы халькопирит, ильменит, гематит, рутил, халькозин, сфен, содержащий примесь F до 1,1 вес. %. Среди акцессорных минералов присутствуют циркон, апатит (F 2,16 вес. %; Cl 1,4 вес. %), кальцит, монацит (Рис. 1в). Отмечается замещение темноцветных минералов хлоритами.

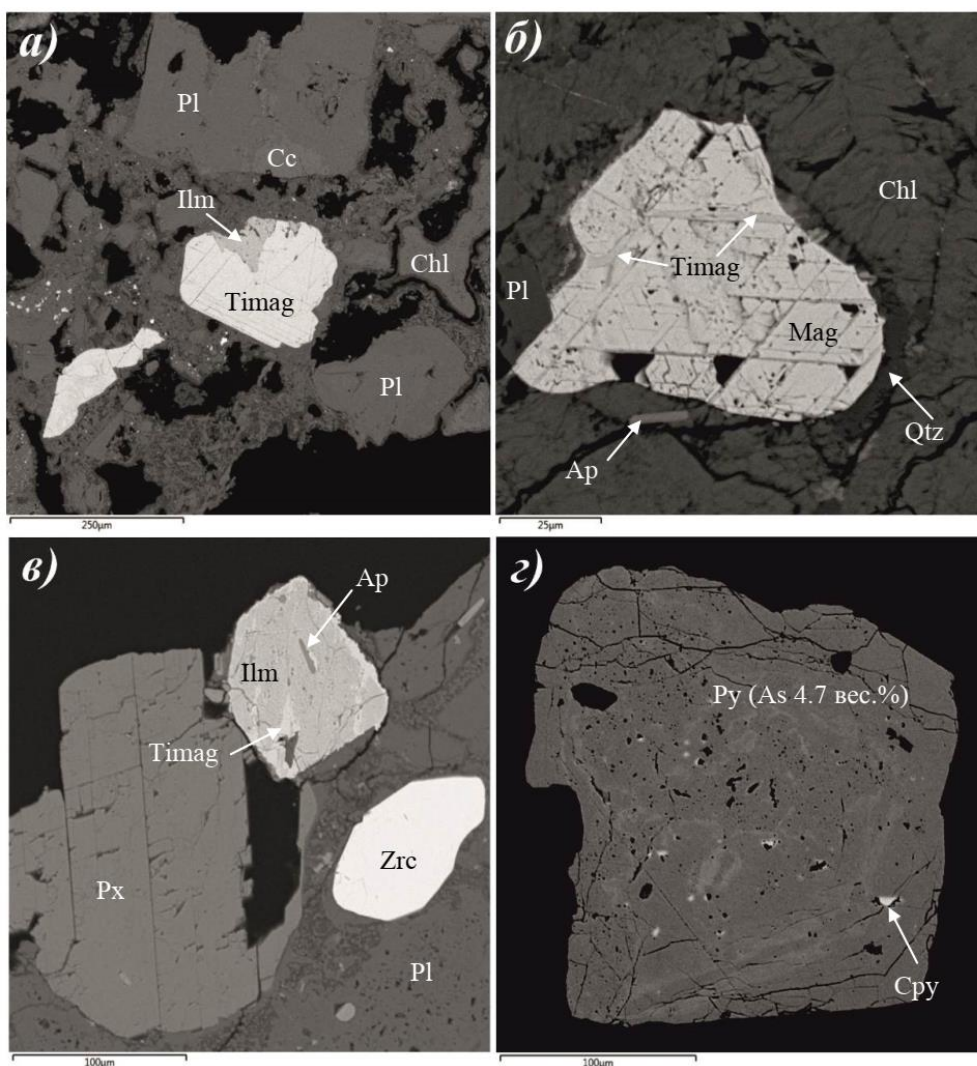


Рисунок 1 – Минеральный состав пород верхнеалнейской (а, б) и нижнеалнейской (в) толщ: Pl – плагиоклазы, Qtz – кварц, Cc – кальцит, Chl – хлориты, Px – пироксены, Ap – апатит, Zrc – циркон, Mag – магнетит, Timag – титаномагнетит; г – мышьяк содержащий пирит (Py) с микровключениями халькопирита (Cpy) в андезитах силла. Фото в обратно рассеянных электронах (Vega III Tescan)

В трахиандезитах и андезитах верхнеасачинской подсвиты (964–1100 м) установлены наибольшие содержания FeO (5 %) и Na_2O_3 (5,5 %). Железо входит в состав большинства породообразующих и акцессорных минералов эффузивно-пирокластической толщи. Минеральные формы железа – магнетит, титаномагнетит, пироксены, хлориты, гематит. В

зонах интенсивных гидротермальных изменений происходит вынос значительных количеств железа с появлением сульфидов, таких как пирит, халькопирит, сфалерит и галенит. Поведение оксида натрия обусловлено особенностями минерального состава пород, степенью региональной пропилитизации и локальных гидротермальных изменений по периферии зон вскипания и поглощения.

В андезибазальты и андезиты силла (1170–1220 м) выявлены кварц-карбонатные и кварц-полевошпатовые агрегаты с вкрапленностью рудных минералов, представленных магнетитом, титаномагнетитом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, пиритом. В последнем установлено максимальное содержание примеси As (4,7 вес. %; Рис. 1Г). В адуляре отмечено содержание Ba до 1,3 вес. %. Акцессорные минералы – монацит, апатит (F 3,3 вес. %; Cl 0,7 вес. %), сфен (F 2,4 вес. %), ильменит (Mn 6 вес. %), рутил.

С глубиной прослеживается увеличение: – интенсивности гидротермальных изменений пород; – количества рудных минералов, их разнообразие и появление элементов-примесей (в первую очередь мышьяка); – масштабов развития минералов, содержащих летучие компоненты (фтор, хлор). Схожие тенденции отмечены при изучении пород ранее пробуренных скважин, в частности расположенной недалеко скв. Гео-6 (гл. 1872 м).

Наличие зон адуляризации, увеличение рудной минерализации, появление с глубиной таких типоморфных минералов золотоносных жил как мышьяксодержащий пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, а также близость расположения Мутновского золото-серебро-полиметаллического месторождения позволяют предположить наличие в скрытых литолого-структурных ловушках жильных зон схожих с главной жилой Определяющая.

Список литературы

1. Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм (на примере Мутновского геотермального месторождения). М.: Наука, 1986. 305 с.
2. *Округин В.М.* Мутновское серебро-полиметаллическое месторождение // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 712–716.

Гидрогеотермальные системы Кавказского региона

В.Б. Свалова

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

Геотермальные ресурсы являются важнейшим источником развития энергетики, редкометальной и химической промышленности, санаторно-бальнеологического и агропромышленного комплексов. Россия обладает огромными запасами гидрогеотермальных, т.е. аккумулированных в подземных водах, и петротермальных, аккумулированных в горных породах, ресурсов. В то же время в России они используются далеко недостаточно. Быстрый рост энергопотребления, ограниченность и удорожание ресурсов невозобновляемого топлива, обострение экологических проблем заставляют мировую экономику широко использовать альтернативные источники энергии.

Наиболее перспективными регионами для практического использования геотермальных ресурсов на территории России являются Северный Кавказ, Западная Сибирь, Прибайкалье, Курило-Камчатский регион, Приморье, Охотско-Чукотский вулканический пояс. Практически повсеместно внутреннее тепло Земли может осваиваться с помощью тепловых насосов.

На примере гидрогеотермальных месторождений Кавказского региона дается геологическое обоснование перспектив выделения высокотемпературных горизонтов термальных вод и горячих массивов. Рассматриваются перспективы локализации петротермальных массивов в виде коровых и мантийных магматических интрузий, формировавшихся как структурно-вещественные комплексы определенных геодинамических обстановок, и мантийные внедрения, транзитом которых служат активные глубинные разломы. Исследуются перспективы развития рекреационно-туристического комплекса Курорты Северного Кавказа.

Ключевые слова: геотермия, сейсмичность, геодинамика, Кавказ, моделирование, сейсмотомография

Введение

Кавказский регион является сложной высоконапряженной геодинамической структурой, характеризующейся повышенным тепловым потоком, высокой сейсмичностью, магматизмом и вулканизмом. Геодинамика Кавказского региона определяется коллизией Евразийской и Аравийской литосферных плит, а также сложной историей развития Альпийско-Гималайского пояса. Решение задачи формирования и эволюции геологических структур в различных сложных геодинамических обстановках требует анализа всех имеющихся геолого-геофизических данных, а также постановки и решения задач механико-математического моделирования. Полученные решения могут использоваться для анализа глубинных геодинамических проблем, а совместно с геотермическим моделированием, геолого-геофизическими методами и сейсмотомографией могут служить надежным аппаратом изучения глубинной геодинамики в связи с эволюцией геологических структур и формированием нефте-газового и гидрогеотермального потенциала региона (Свалова 2019, 2020).

Геодинамика и геотермия Кавказа

С точки зрения глубинной геодинамики Кавказ входит в одну из наиболее активных зон коллизии литосферных плит, характеризующихся значительными скоростями горизонтальных и вертикальных движений.

Поле скоростей Северного Кавказа характеризуется горизонтальным смещением в северо-восточном направлении со скоростью 26–28 мм/год. Относительно неподвижной Евразии выявлено общее сжатие региона со скоростью 1–2 мм/год, которое является источником современной геологической и сейсмической активности в пограничной области Кавказа и Восточно-Европейской платформы.

Современные вертикальные движения Северо-Кавказского региона характеризуются небольшими вертикальными движениями 2,5 мм/год в равнинной части Осетии, наибольшими для региона скоростями подъема порядка 3,5–4,5 мм/год в горной части Северного Кавказа и умеренным устойчивым подъемом 2,9 мм/год в северной части северного склона Большого Кавказа.

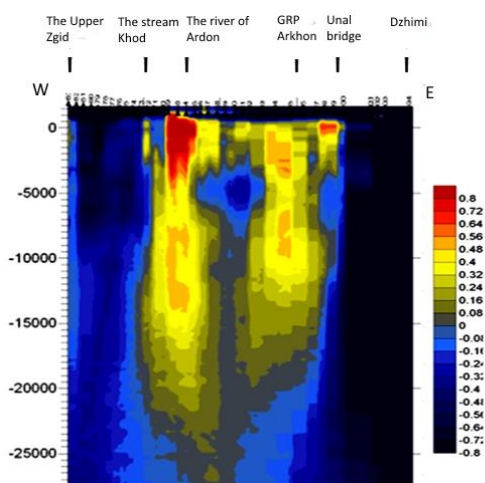


Рисунок 1 – Профиль микросейсмического зондирования Кавказа до глубины 60 км. Фиксируется разуплотненное тело до глубины Мохо и глубже. Показаны положительные (темные) и отрицательные (светлые) отклонения скорости поперечных волн. (Рогожин и др., 2015)

наличии разломов, трещиноватости пород, проявлении магматизма и вулканизма, высокой сейсмичности, повышенного теплового потока, гидротермальной активности, а также подтверждается данными сейсморазведки и сейсмотомографии (Koulakov et al., 2012; Рогожин и др., 2015) (Рис. 1).

Значение плотности теплового потока является показателем геодинамической активности структур литосферы. Кавказский регион характеризуется сложным и сильно дифференцированным тепловым полем. Пониженные потоки соответствуют предгорным и межгорным прогибам, повышенные складчатым зонам. Среднее значение теплового потока для складчатой области Кавказа составляет 78 мВт/м^2 .

Характер теплового поля Кавказского региона хорошо коррелируется с особенностями его геологического строения и истории развития. Зоны складкообразования и проявления молодого вулканизма выделяются высокими тепловыми потоками. Предгорным и межгорным прогибам соответствуют в основном низкие тепловые потоки.

В прогибах значительное влияние на характер теплового поля оказывает строение осадочного чехла и структура фундамента.

Геотермальные ресурсы Юга России

Республика Дагестан на Северном Кавказе является одним из крупнейших регионов развития геотермальной энергетики. Общая сумма ресурсов на глубине 0,5–5,5 км позволяют получать около 4 млн. $\text{м}^3/\text{сут.}$ геотермального флюида. В настоящее время более 7,5 млн. $\text{м}^3/\text{год}$ горячей воды с температурой 50–110 °С используется в Дагестане. Среди них 17 % – горячая вода; 43 % для централизованного теплоснабжения; 20 % для теплиц и 3 % для бальнеологии и производства минеральной воды. Всего в Дагестане пробурено около 180 скважин на глубину от 200 до 5 500 м. Районы таких городов как Кизляр, Тарумовка и Южносухумск обладают уникальными запасами горячей воды.

Например, Тарумовское месторождение обладает запасами геотермальной воды высокой солености (200 г/л) с температурой до 195 °С. Пробурено шесть скважин глубиной около 5 500 м, это самые глубокие геотермальные скважины в России. Тесты указывают на высокую проницаемость резервуаров скважин с производительностью от 7500 до 11000 $\text{м}^3/\text{сут.}$ при устьевом давлении 140–150 бар.

На Кавказе и в Предкавказье термальные воды образуют многослойные артезианские бассейны в отложениях мезозойской и кайнозойской эры.

Согласно геодинамическим представлениям, на месте Большого Кавказа 35 млн. лет назад существовал глубоководный бассейн шириной около 200 км. При постепенном закрытии его борта сближались до полного столкновения около 11 млн. лет назад, после чего регион стал испытывать постоянное воздымание. При сжатии вещество литосферы образовало горный пояс с толщиной коры 45–50 км и толщиной литосферы до 250 км. В дальнейшем 5–10 млн. лет назад Большой Кавказ стал быстро подниматься, а на его оси возникли вулканы Эльбрус, Казбек и др.

Видимо, это связано с подъемом астеносферы вследствие сжатия и гравитационной неустойчивости. Возможно, ситуацию можно сравнить с развитием задугового спрединг, когда горячий мантийный диапир прорывается сквозь литосферу к земной поверхности и формирует задуговой бассейн.

Сложное напряженно-деформированное состояние литосферы Кавказа выражается в

Минерализация и температура этих вод существенно различаются: в передовых прогибах на глубинах 1–2 км – от 0,5 до 65 г/кг и от 0,5 до 65 г/кг при температурах от 70 до 100 °С соответственно, а на Скифской платформе на глубинах 4-5 км – от 1 до 200 г/кг при температуре от 50 °С до 170 °С.



Рисунок 2 – Геотермальные ресурсы южной части России в Краснодарском и Ставропольском краях, Дагестане и Чечне

В Дагестане общие разведанные запасы термальных вод составляют 278 тыс. м³/сут. при проточном режиме, а при закачке отработанной воды – 400 тыс. м³/сут, при этом тепловой потенциал эквивалентен ежегодной замене 600 тыс. т условного топлива. Основные разведанные ресурсы термальных вод с температурой от 40 до 107 °С с минерализацией 1,5–27 г/л расположены в Северном Дагестане. За последние 40 лет в этом районе открыто 12 основных месторождений термальных вод и пробурено и подготовлено к эксплуатации 130 скважин (Рис. 2). Однако в настоящее время используется только 15 % потенциала известных запасов термальных вод. (Svalova, 2018; Heat-mass..., 2021, Zaalishvili et al., 2021).

Краснодарский край также обладает значительными запасами геотермального тепла, имеет большой опыт использования геотермальных источников энергии. Таким образом, в эксплуатации находятся 50 геотермальных скважин, дающих воду объемом до 10 млн. м³ с температурой 75–110 °С. В масштабе региона использование геотермальной энергии в Краснодарском крае позволит обеспечить до 10 % всей потребности в тепле и до 3 % всей потребности региона в энергии. Геотермальная энергетика имеет большие перспективы в Краснодарском крае. Суммарная тепловой потенциал находящихся в эксплуатации геотермальных полей составляет 238 МВт.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-47-02010, «Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India») и темы НИР (№ 0142-2014-0027 «Развитие теории и методов изучения новейшей тектоники и современной геодинамики платформенных и орогенных территорий применительно к оценке их безопасности»).

Список литературы

1. Рогожин Е.А. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении / Е.А. Рогожин, А.В. Горбатилов, М.Ю. Степанова, и др. // Геотектоника. 2015. № 2. С. 36–49.
2. Свалова В.Б. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона. / В.Б. Свалова // Геология и геофизика Юга России. 2020. № 10(4). С. 52–69.
3. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики / В.Б. Свалова // Геология и геофизика Юга России. 2019. № 9 (3). С. 77–93.
4. Heat-mass transfer and geodynamics of the lithosphere. / Svalova V.B. (Editor). 2021. Springer book: 89082526. 559 p.
5. Koulakov I. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. / I. Koulakov, I. Zabelina, I. Amanatashvili, et al. // Solid Earth. 2012. № 3. pp. 327–337.
6. Svalova V.B. Geothermal resources complex utilization in Russia. / V. B. Svalova // Proceedings of the international geothermal conference geoheat 2018, September 04–07. Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation. pp. 8.

7. *Zaalishvili V.* Prospects for identifying and applied use of hydro and petrothermal energy sources in geodynamically active structures of the eastern segment of the Central Caucasus. / *V. Zaalishvili, Kh. Chotchaev, O. Burdzieva et al.* // Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. / *V. Svalova* (ed.) Springer book: 89082526. 2021. pp. 35–63.

УДК 556.3

Features of the composition of thermal waters of the Khulzh deposit

Surmaazhav Damdin, Batzhargal Damba, Ariunaa Chinbat

*Association of «Mongolian Hydrogeologists», Mongolia
surmaaajvdamdin@yahoo.com*

Thermal waters belong to the category of valuable and widespread mineral waters, on the basis of which resorts, sanatoriums, and boarding houses are created. An in-depth study of issues related to the peculiarities of the distribution of hydrothermal fluids in the territory of Central Mongolia and the conditions of their formation is not only of practical interest, but also has important theoretical significance. Geothermal systems of Central Mongolia are characterized by increased heat fluxes due to both local accumulations of thermal water in the earth's interior and the transfer of deep heat due to convection, and uniform heating of rocks over large areas due to thermal conductivity (conduction). The deposit is confined to the seismically active part of Central Mongolia, where the Khangai uplift is strongly fragmented into separate blocks, and the depressions are grabens or near-fault troughs. Fault zones are one of the main water-bearing structures that ensure the accumulation of sediments, movement, and redistribution over the area of underground fluids and their unloading. The thermal waters of the Khulzhinsky field belong to the so-called Khulzhinsky type. They are characterized by low salinity, sodium sulphate composition, high temperature, alkaline reaction and high silicon content. Nitrogen prevails among dissolved and spontaneous gases. The operational reserves (for a period of 27 years) have been calculated, which amount to 535.6 m³/day for industrial category C.

Keywords: Geothermal system, Tectonic structures, Flooded faults, Thermal waters, Springs, Chemical composition

Особенности состава термальных вод месторождения Хульж (Центральная Монголия)

Сурмаажав Дамдин, Батжаргал Дамба, Ариунаа Чинбат

Ассоциация монгольских гидрогеологов, Улан-Батор, Монголия

Термальные воды относятся к категории ценных и распространенных минеральных вод, на базе которых создаются курорты, санатории, пансионаты. Глубокое изучение вопросов, связанных с особенностями распространением гидротерм на территории Центральной Монголии и условиями их формирования, представляет не только практический интерес, но и имеет важное теоретическое значение. Месторождение приурочено к сейсмоактивной части Центральной Монголии, где Хангайское поднятие сильно раздроблено на отдельные блоки, а впадины представляют собой грабены или приразломные прогибы. Зоны разломов являются одними из основных водовмещающих структур, обеспечивающих накопление отложениями, движение, перераспределение по площади подземных флюидов и их разгрузку. Термальные воды Хульжинского месторождения относятся к так называемому Хульжинскому типу. Они характеризуются низкой минерализацией, сульфатным натриевым составом, высокой температурой, щелочной реакцией и высоким содержанием кремния. Среди растворенных и спонтанных газов преобладает азот. Подсчитаны эксплуатационные запасы (на срок 27 лет), которые составляют 535,6 м³/сут. по промышленной категории С.

Ключевые слова: геотермальная система, тектонические структуры, обводненные разломы, термальные воды, источники, химический состав

Введение

Минеральные и термальные источники Монголии, включая и Хангайского неотектонического поднятия, издавна привлекали внимание местное население в лечебных целях. Несмотря на расположенность в труднодоступных районах, «аршаны» регулярно посещались не только местным населением, но и многочисленными путешественниками. Монгольские ламы знали о целебных свойствах минеральных вод и в ряде случаев контролировали лечебный процесс. Выходы минеральных и термальных вод оборудовались примитивными устройствами для принятия ванн «дикие курорты». Трещинно-жильные термальные воды, как правило, обладают необычными свойствами, особенностями распространения, химическим и газовым составом, иногда высокой температурой, нередко значительными дебитами родников (Пиннекер и др., 1976 и Маринов, 1963). Термальные воды относятся к категории ценных и распространенных минеральных вод, на базе которых в стране создаются курорты, санатории, пансионаты. Глубокое изучение вопросов, связанных с особенностями распространением гидротерм на территории Центральной Монголии и условиями их формирования, представляет не только практический интерес, но и имеет важное теоретическое значение.

Геотермальные системы Центральной Монголии характеризуются повышенными тепловыми потоками, обусловленными как локальными скоплениями термальной воды в земных недрах и переносе глубинного тепла за счет конвекции, так и равномерным прогревом горных пород на больших площадях за счет теплопроводности (кондукция). Горячие источники со свойственной газовой составляющей представляют собой поверхностные проявления гидротермальных систем. Установлено, что под районами Центральной Монголии в верхней мантии сконцентрирован малоплотный и аномально нагретый материал. С областью разуплотнения мантии пространственно и генетически связаны излияния базальтов в неогено-четвертичное время. Наиболее молодые базальты приурочены к оси Хангайского поднятия. В этой зоне сконцентрировано большое количество термальных источников с температурой 35–86 °С и содержанием $He = 0,25–1,0 \%$. Пространственно очаги разгрузки гидротермальных систем Монголии находятся в районах проявлений четвертичного вулканизма. Подтверждением дополнительного теплового питания является повышение изотопного отношения гелия в пробах газа, отобранных из источников, приуроченных к району развития четвертичного вулканизма (Хугорской, 1991). Максимальные отношения ${}^3He/{}^4He = 10^{-5}$, определенные в газах, отражают примесь первичного He , сохранившегося в подкоровых геосферах, и являются прямым индикатором современной разгрузки тепломассопотока из мантии в земную кору.

Формирование месторождения термальных вод – весьма сложный процесс, определяющийся многими факторами, часто накладывающимися друг на друга. Изучением проблемы формирования и генезиса гидротерм, их распространения в различных геолого-гидрогеологических и геотермических обстановках занимались в разное время многие ученые. По наличию и качеству разнообразных минеральных и термальных источников Хангайское поднятие практически превосходит другие районы Монголии. На данной территории выявлены многочисленные источники и месторождения термальных вод, такие как Хужирт, Шивэрт, Шаргалжуут, Хульж и др. До настоящего времени остается ряд нерешенных вопросов, в частности, особенности состава, происхождения, формирования и распределения термальных вод в гидрогеологических структурах Монголии. Поэтому на основе анализа существующих материалов рассмотрим гидрогеологические условия месторождения Хульж и особенности химического и газового состава термальных вод обводненных разломов (Сурмаажав, 2019).

В связи с этим, на формирование и распространение подземных вод существенное влияние оказывает процесс разломообразования, развивающийся в течение длительного периода и продолжающийся в современную эпоху. Об этом свидетельствует повышенная сейсмичность данного района, излияния кайнозойских базальтов и существование молодых разломных зон. Многие тектонические нарушения хорошо выражены в рельефе уступами высотой до первых десятков, реже сотен метров, разломными линейными впадинами,

протяженными и прямолинейными долинами, ложбинами, резким изгибом долин, наличием висячих долин с линейно расположенными источниками, заболоченностью местности, увлажненностью пород с сочным растительным покровом и т.д.

Месторождение находится в 350 км к западу, северо-западу от г. Улаанбаатара, на территории Булганского аймака, в 2 км к юго-западу от административного центра Могот сомона. Абсолютная высота в районе месторождения около 1450 м. Проявления сульфатных натриевых гидротерм Хульж впервые были описаны В.А. Смирновым в 1927 г. В разные годы его посещали Ф.К. Шипулин (1941 г.), В.Н. Попов (1946 г.), О. Намнандорж, Ш. Цэрэн (1958 г.) и Г.М. Шпейзер, Б.И. Писарский (1973 г.), З. Нарангэрэл, Н. Лхагва (1974 г.) и др.

Термальный источник расположен в большой бессточной плоскодонной межгорной котловине, вытянутой в меридиональном направлении на 16 км. Ее ширина изменяется от 3 до 4 км, увеличиваясь на участке выхода термальных вод до 6 км. Днище котловины заболочено, отмечается группа небольших озер. Природная обстановка и некоторые особенности проявлений термальных вод существенно изменились после крупнейшего Могодского землетрясения, произошедшего в 1967 г.

В геологическом строении месторождения термальных вод Хульж принимают участие эффузивные породы верхнего триаса и нижнеюрского возраста и нерасчлененные четвертичные отложения (Рис. 1). Эффузивные породы представлены андезит-базальтами от светло-серых до темно-серых цветов, андезит-порфирами и туфами, которые на участке разведки вскрыты всеми скважинами на глубинах 36–62 м. Нерасчлененные четвертичные отложения представлены, главным образом, разнозернистыми песками с включением и отдельными слоями валунно-гравийно-галечникового материала мощностью до 2–4 м. Установлено, что выход термальных вод приурочен к зоне тектонического дробления эффузивных пород верхнего триаса – нижнеюрского возраста, перекрытых аллювиальными образованиями.

Разгрузка термальных вод связана с оперяющимися разломами северо-восточного простирания (20–30°) при их крутом падении на юго-запад под углом 80–95°. Общая площадь очага выходов гидротерм вместе «с растеканием» минеральных вод достигает 0,3 км². Участок разгрузки термальных вод в горизонт грунтовых вод аллювиальных отложений венчается образованием, так называемого, «гидродинамического и гидротермального купола». Формирование такого очага разгрузки современных гидротерм связано с их внедрением в приповерхностный «холодный» водоносный горизонт аллювия.

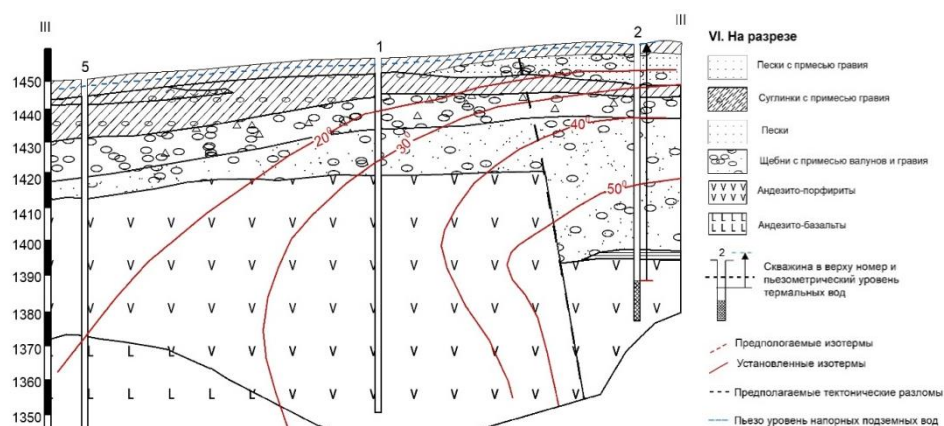


Рисунок 1 – Гидрогеологический разрез месторождения Хульж (Нарангэрэл З., 1979)

Термальные воды были вскрыты поисково-разведочными скважинами на глубинах от 6 (в рыхлых отложениях) до 202 м (в коренных породах) с температурой 20–55 °С и дебитами 0,3–4,6 л/с при понижениях 2,0–2,6 м, соответственно (Нарангэрэл, 1979). Комплексными исследованиями на месторождении установлено, что геотермальное поле занимает обширную территорию и выходит за пределы разведанных контуров месторождения. Участок разгрузки гидротерм вытянут в северо-восточном направлении и связан с узлом пересечения северо-восточного и северо-западного тектонических нарушений с мощнейшим сейсмогенерирующим разломом меридионального простирания. Выводящим термальные воды является северо-

восточный разлом, круто падающий на юго-восток в сторону заболоченной долины. Значительная раскрытость горного массива способствует миграции газовых потоков снизу, что подтверждается высокой концентрацией гелия ($2,8-3,5 \times 10^{-2}$ мл/дм³).

Термальные воды Хульжинского месторождения относятся к так называемому Хульжинскому типу и характеризуются низкой минерализацией (не более 0,83 г/дм³), сульфатным натриевым составом, высокой температурой (45–57 °С), щелочной реакцией ($pH = 8,75$) и высоким содержанием кремния (H_4SiO_4) от 93 до 185 мг/дм³ (Пиннекер, 1976). Газовый состав гидротерм по данным наблюдений за период 1972–2005 гг. следующий (Писарский, 2007). Газонасыщенность термальных вод невысокая и изменяется от 10,0 до 26,6 мл/дм³. Среди растворенных и спонтанных газов преобладает азот, концентрация которого изменяется от 96,99 до 97,78 об. % в свободной форме, и от 92,86 до 98,58 об. % – в растворенной. Присутствует постоянно метан, содержание которого сохраняется в пределах 0,5–0,6 об. % (в спонтанном виде) и 0,16–1,1 об. % (в растворенной форме). Химический состав термальных вод, отобранных 25.09.2020 г. на месторождении, следующий:

$$M_{0,6} \frac{SO_4 73 Cl 19}{(Na + K) 77 Ca 24} \text{ при } pH = 8,12; T^\circ = 54^\circ C; H_2SiO_3 = 70,5 \text{ мг/л} \quad (1)$$

Содержание аргона варьируется от 1,16 до 1,61 (в спонтанном газе) и от 1,3 до 2,75 об. % – в растворенном состоянии. Следует отметить присутствие в газовом составе водорода (0–2,63 об. %) и высокую концентрацию гелия (0,43–1,2 об. % – для свободных, 0,217–0,74 об. % – для растворенных). Содержание гелия в термальных водах из скважины составляет $3,5 \text{ мл/дм}^3 \times 10^{-2}$ или 673 фона. Зависимость $^3He/^4He \times 10^{-8}$ соответствует 280–310, при этом концентрация $He_{\text{мант}} = 25,0-27,7$ % от общего содержания (Писарский Б. И., 2007). Все свободные газовые эманации имеют значения аргон-азотного отношения более или равны 1 (1,0–1,39). Имеющиеся данные по газовым показателям термальных вод могут свидетельствовать о их глубинном происхождении. В 2020 г. на месторождении Хульж проведена оценка содержания разных компонентов в термальных водах с использованием полного химического анализа (Табл. 1).

Таблица 1. Содержание химических элементов в термальных водах месторождения Хульж

Компонент	Al	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Sr	Ti	V	Zn
Минимальные допустимые значения прибора «ISO-80»	10	10	0,05	10	5	50	0,1	0,05	5	0,05	50	1	10	10	5
Единица измерения	µг/л	µг/л	мг/л	µг/л	µг/л	µг/л	мг/л	мг/л	µг/л	мг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л
Термальные воды месторождения	125	<10	42,7	<10	<5	<50	6,3	0,19	<5	194	51	2010	<10	<10	6
Компонент	Be	Sc	Co	Ni	Ga	Mo	As	Se	Rb	Y	Zr	Nb	Ag	Cd	In
Минимальные допустимые значения прибора «ISO-80»	0,1	1	0,06	0,3	0,02	0,1	0,03	0,2	0,01	0,005	0,05	0,005	0,2	0,01	0,001
Единица измерения	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л
Термальные воды месторождения	<0,1	17	0,17	1,1	0,43	25,8	19,9	<0,2	15,7	0,047	0,33	0,384	<0,2	<0,01	<0,001
Компонент	Sn	Sb	Te	Cs	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
Минимальные допустимые значения прибора «ISO-80»	0,1	0,2	0,1	0,001	0,01	0,05	0,006	0,01	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001
Единица измерения	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л
Термальные воды месторождения	0,2	<0,2	<0,1	20,7	0,04	0,08	0,009	0,04	0,002	0,005	0,008	<0,002	0,007	0,002	0,002
Компонент	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U			
Минимальные допустимые значения прибора «ISO-80»	0,001	0,001	0,002	0,004	0,001	0,05	0,5	0,007	0,5	0,01	0,002	0,004			
Единица измерения	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л	µг/л			
Термальные воды месторождения	0,001	0,001	<0,002	0,143	0,234	11	<0,5	<0,007	<0,5	<0,01	0,076	0,011			

Полный химический анализ гидротерм был выполнен методом атомно-абсорбционной спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой в лаборатории SGS-IMME Mongolia LLC по методике ISO/IEC 17025 ICP80T на установке WATER ANALYSIS BY ICP-AES.

Для складчатых областей Монголии, к которым относится район месторождения, характерны крайне сложные структурно-гидрогеологические условия с трещинно-жильным, трещинным, пластово-трещинным типом коллекторов, их фильтрационной неоднородностью, переменными путями фильтрации и разгрузки подземных вод. Основными типами минеральных вод здесь являются углекислые самого разнообразного состава и азотные термальные слабоминерализованные, формирование которых связано с неотектонической активизацией, а также процессами регионального термометаморфизма.

Прогнозная оценка естественных ресурсов термальных вод может выполняться через величину естественных ресурсов, скрыто разгружающихся во впадину с минеральными водами по зависимости (Бондаренко и др., 1986):

$$Q_e = I_H \times k_a \times b \times q \quad (2)$$

где I_H – общая протяженность тектонических нарушений в данной структуре, м; k_a – коэффициент гидрогеологической активности нарушения; b – средняя для региона эффективная мощность активного тектонического нарушения, м; q – удельный расход разгружающихся вод через зону нарушения, отнесенный к единице площади тектонического нарушения.

Выполненная прогнозная оценка естественных ресурсов термальных вод данного месторождения составляет 23,3 л/с, из них величина эксплуатационных запасов (Q_3) в среднем определяется соотношением $0,3 \times Q_3$. Кроме этого, с использованием гидравлического метода были подсчитаны эксплуатационные запасы (на срок 27 лет), которые составляют 6,2 л/с или $535,6 \text{ м}^3/\text{сут}$, что вполне сопоставимо с приведенным ранее расчетом по интегральной зависимости. В настоящее время на термальных источниках Хульж сезонно действует курорт местного значения. Отметим, что высокие лечебные качества термальных вод, значительные ресурсы месторождения Хульж и благоприятные природно-экономические условия местной территории создают предпосылки для дальнейшего расширения гидроминеральной базы Хангайской гидротермальной области.

Теплоснабжение в стране на базе гидротермальных ресурсов развивается, в основном, путём создания мелких объектов отопления, горячего водоснабжения и бальнеологии. Для уточнения потенциала тепловых ресурсов Центральной Монголии произведен расчёт суммарно возможной выработки тепла. Естественные ресурсы термальных вод на территории Хангая выражаются величиной $17044 \text{ м}^3/\text{сут}$, что можно представить данное значение в виде $1880,9 \text{ ГДж/сут}$ энергетического потенциала (Сурмаажав, 2020). Оцененный тепловой поток гидротерм Хангайской гидротермальной системы, в дальнейшем, позволяет обеспечить значительное расширение практического использования гидроминеральной и теплоэнергетической составляющей природных ресурсов страны.

Список литературы

1. Геохимия подземных минеральных вод МНР / *Е. В. Пиннекер, Б. И. Писарский, П. Доржсурен* [и др.]. М.: Наука, 1976. 79 с.
2. *Нарангэрэл* З. Условия формирования месторождений минеральных вод центральной части МНР и перспективы их освоение: дис. канд. геол.-мин. наук. М.: 1979. 179 с.
3. *Маринов Н.А.* Гидрогеология Монгольской Народной Республики / *Н.А. Маринов, В.А. Попов*. М.: Гостехиздат, 1963. 451 с.
4. Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод / Под ред. *С.С. Бондаренко, Г.С. Вартамяна*. М.: Недра, 1986. 479 с.
5. *Писарский Б.И.* Газовый состав подземных минеральных вод Монголии / *Б.И. Писарский, Д. Ганчимэг*. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. 106 с.

6. *Сурмаажав Д.* Особенности проявлений термальных вод Хангайского сводового поднятия (Монголия) // *Науки о Земле и недропользование*. Том. 42. 2019. № 4. С. 529–538.

7. *Сурмаажав Д.* Теплоэнергетические ресурсы термальных вод Центральной Монголии // *Успехи современного естествознания*. 2020. № 9. С. 106–112.

8. *Хуторской М. Д.* Тепловой режим недр МНР / *М.Д. Хуторской, В.А. Голубев, С.В. Козловцева [и др.]*. М.: Наука, 1991. 126 с.

CHAPTER II. MAGMA-HYDROTHERMAL SYSTEMS

РАЗДЕЛ II. МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 556.3

Geothermal energy worldwide use

Alexey Kiryukhin

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

Installed capacity of geothermal power plants of the world is 15950 MWe, actually generated 10885 MWe, direct use of geothermal energy for heating, balneology and agriculture 32372 MWt. (according to WGC-2020+1). The most productive high-temperature geothermal reservoirs are formed in zones of magmatic activity in volcanic areas. Attempts to extract geothermal energy from magma (KMT), hot (HDR) and super-hot (SCGR) low-permeability rocks in the brittle (EGS) and ductile (SC BBD) conditions continue. The use of geothermal resources of the Mutnovsky and Paratunsky fields can fully meet electric and thermal energy needs in Kamchatka.

Keywords: geothermal, reservoir, volcanic, magma, modeling, MEQ

Использование геотермальной энергии в мире

А.В. Кирюхин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Установленная мощность геотермальных электрических станций мира составляет 15950 MWe, фактически вырабатываемая 10885 MWe, прямое использование геотермальной энергии для отопления, бальнеологии и сельского хозяйства 32372 MWt. (по данным WGC-2020+1). Наиболее продуктивные высокотемпературные геотермальные резервуары формируются в зонах магматической деятельности в вулканических областях. Продолжаются попытки извлечения геотермальной энергии из магмы (KMT), горячих (HDR) и супер-горячих (SCGR) низко-проницаемых горных пород в хрупком (EGS) и пластичном состоянии (SC BBD). Использование геотермальных ресурсов Мутновских и Паратунских месторождений может полностью обеспечить потребности в электрической и тепловой энергии на Камчатке.

Ключевые слова: геотермальный, резервуар, вулканический, магма, моделирование, MQE

1. Введение

В данной статье изложено актуальное состояние использования геотермальной энергии в мире с учетом материалов Международного геотермального конгресса (2020+1). Корреляция магматической активности вулканов с геотермальными ресурсами высокотемпературных геотермальных месторождений (Stefansson, 2005) рассматривается на примерах научно-исследовательского разбуривания контактов магматических и гидротермальных систем.

2. Использование традиционных геотермальных месторождений

2.1 США

По состоянию на 2018 г установленная мощность ГеоЭС составила 3806 MWe (эффективная 2104 MWe). ГеоЭС расположены в Калифорнии, Неваде, Юте и на Гавайях, а также недавно установлены на Аляске, в Айдахо, Нью-Мексико и Орегоне, причем за последние пять лет было добавлено 312 MWe. Две крупнейшие концентрации ГеоЭС находятся на месторождении Гейзерс (1495 MWe установлено, эффективная мощность 858 MWe) на севере Калифорнии и в Империял Вэллей (741 MWe установлено, эффективная мощность 537 MWe) на юге Калифорнии. В Гейзерс продолжается закачка сточных вод, что привело к дополнительной мощности около 200 MWe. Самая низко-температурная ГеоЭС

находится в Chena Hot Springs на Аляске, где установки бинарного цикла используют термальную воду с температурой 74 °С для выработки 730 кВт. Прямое использование геотермальной энергии: установленная мощность составляет 17416 MWt. Наибольшее применение находят тепловые насосы GHP с использованием геотермальной энергии грунтов 15326 MWt.

2.2 Индонезия

Общая установленная мощность ГеоЭС к 2019 году составила 2138,5 MWe, в том числе: Сибаяк (12 MWe), Камоджанг (235 MWe), Дараджат (270 MWe), Диенг (60 MWe), Гунунг Салак (377 MWe), Лахендонг и Томпасо (120 MWe), Ваянг Винду (227 MWe), Улу Белу (Лампунг, 220 MWe), Патуха – Западная Ява (55 MWe), Улумбу – Флорес (10 MWe), Сарулла – Северная Суматра (330 MWe, и Караха – Западная Ява (30 MWe), Лумут Балай – Южная Суматра (55 MWe), Сорик Марапи (50 MWe), блок 1 Сокория (5 MWe) и Муара Лабох – Западная Суматра (80 MWe). Ожидаемый вклад геотермальной энергии в энергобаланс Индонезии составляет 7,2 GWe (23 %) к 2025 году.

2.3 Филиппины

Общая установленная мощность ГеоЭС – 1918 MWe, в том числе Makban 458,5 MWe (эффективная 234 MWe за период с 1979 по 2018 г), Tiwi – 234 MWe (эффективная 158 MWe за период с 1979 по 2018 г), Northern Negros 49 MWe (фактически не обеспечена ресурсами), Palinpinon – 192,5 MWe (эффективная 105 MWe за период с 1979 по 2018 г), Nasulo – 30 MWe, Васман – с 1979 г фактическая выработка 12770 GW-hr, Mindanao – 108,5 MWe (фактическая выработка 12770 GW-hr), Tongonan и Leyte – пробурено 233 скважины с 1979 г., эффективная мощность 286 MWe за период с 1977 по 2018 г, Maibarara – 20 MWe (эффективная 20 MWe).

2.4 Турция

Установленная мощность ГеоЭС – 1663 MWe (1263 MWe бинарного цикла В и 400 MWe на паре 1F-3F) по состоянию на 12.2020. Продолжается разведка глубоких пластов, глубина бурения достигла 4800 м. Гидротермальные системы формируются в условиях глубинной циркуляции метеорных вод в субширотных грабенах горизонтального растяжения. При этом западная часть Турции характеризуется наиболее значительной геотермальной активностью с температурами до 287 °С. Геотермальные месторождения приурочены к мраморным и карбонатным резервуарам, характеризующимся термогенной генерацией CO₂. Примером успешного освоения является Kızildere, где в 1984 г была запущена ГеоЭС 17,4 MWe 1F, но уже в 2017 г она достигла уровня производительности 260 MWe, 3F+В (температура резервуара 240 °С, NCG 1–4 %wt).

Прямое использование геотермальной энергии достигло 3828.5 MWt, включая централизованное теплоснабжение (1120 MWt), отопление теплиц, домов, гостиниц и т.д. (1290 MWt), бальнеологическое использование (1400 MWt), сельскохозяйственную сушку (9,5 MWt) и применение тепловых насосов GHP (8,5 MWt).

2.5 Кения

Общая установленная мощность составляет 865 MWe, что составляет около 29 % от общей установленной электрической мощности в Кении и около 47 % потребляемой электроэнергии в 2019 году. Геотермальное месторождение Олкария на сегодняшний день является крупнейшим производственным объектом с текущей установленной мощностью 689,7 MWe, в то время как установленная мощность месторождения Эбуруу составляет 2,5 MWe. Установленная мощность прямого использования геотермальных ресурсов составляет 18,5 MWt.

2.6 Мексика

Установленная мощность 1005,8 MWe, с пятью действующими ГеоЭС: Серро Прието, Лос Азуфрес, Лос Хумерос, Лас Трес Виргенес и Домо де Сан Педро. Вырабатываемая мощность составляет 947,8 MWe. Серро Прието по-прежнему является крупнейшим месторождением в Мексике и вторым в мире с выработкой 570 MWe.

2.7 Новая Зеландия

Установленная мощность ГеоЭС – 1032 MWe (эффективная 863 MWe) обеспечивает около 18 % общего производства электроэнергии в стране. В настоящее время Новая Зеландия производит около 75 % электроэнергии из возобновляемых источников. Общая установленная мощность станций Wairakei составляет 429 MWe (эффективная 316 MWe). В Ohaaki было первоначально установлено 116 MWe в 1989 г, но после начального периода полной выработки до 1993 г была ограничена из-за проблем с ресурсами, в настоящее время выработка 37 MWe. Остальные ГеоЭС: Mokai 111 MWe (106 MWe), Kawerau 177 MWe (143 MWe 2F), Rotokawa 174 MWe (145 MWe), Northland (Ngawha) 25 MWe (23 MWe), Tauhara 26 MWe (22 MWe), Ngatamariki 82 MWe (74 MWe). На высокотемпературных месторождениях пробурено 12 добычных скважин (23,4 км) за 2015–2020 гг. Прямое использование – 587 MWt, в том числе грунтовые тепловые насосы GHP 12,6 MWt.

2.8 Италия

ГеоЭС расположены в Тоскане, в двух «исторических» районах Лардерелло-Травале (работает с 1904 года) и Монте-Амиата: установленная мощность 915,5 MWe (эффективная мощность 807 MWe), 37 генерирующих блоков и более 500 скважин, вскрывающих неглубокозалегающие карбонатные резервуары. Геотермальное месторождение Лардерелло продуцирует 595 MWe, площадь 250 км², на месторождении 200 скважин вскрывающих перегретый пар (2–15 бар, 150–270 °С, содержание NCG 1–10 % wt). Геотермальное месторождение Травале продуцирует 200 MWe, площадь 50 км², 40 скважин вскрывающих перегретый пар (7–18 бар, 190–250 °С, NCG 5–6,5 % вес.). Геотермальное месторождение Монте Амиата 121 MWe, двухфазный теплоноситель (20 бар, NCG 5–8 % wt).

2.9 Япония

Установленная мощность ГеоЭС 554 MWe (эффективная 275 MWe), в том числе: Matsukawa 23.4 (8,3), Onuma 9,5 (5,0), Onikobe 15 (-), Nachubary 55 + 55 (28,7 + 41,2), Kakkonda 50 + 30 (14.9 + 13.1), Mori 25 (16,8), Uenotai 8,8 (20,1), Yamakawa 30 (13,2), Sumikawa 50 (32,1), Fukushima 30 (15,2), Ogiri 25,8 (16,7), Takigami 27,5 (25,4), Nachijojima 3,3 (1,2). Прямое использование – 2407 MWt, в том числе GHP 163 MWt.

2.10 Исландия

Установленная мощность ГеоЭС 755 MWe (эффективная 686 MWe): Krafla 60 MWe (эффективная 55 MWe), Svartsengi 76 MWe (70 MWe), Bjarnarflag 5 MWe (5 MWe), Nesjavellir 120 MWe (110 MWe), Hellisheidi 303 MWe (273 MWe), Reykness 100 MWe (91 MWe), Theistareykir 90 MWe (84 MWe). Прямое использование 1064 MWt. Доля геотермальной энергии в электрообеспечении Исландии составляет 30 %, в теплообеспечении 90 %.

3. Разработка новых технологий использования геотермальной энергии

Предполагается, что сверхкритические (SC, с температурой выше 375 °С) или сверхгорячие (SH) эксплуатационные геотермальные резервуары могут быть обнаружены под обычными эксплуатационными геотермальными резервуарами или могут быть созданы там искусственно (гидротермальный разрыв пласта) в качестве инжиниринговых (расширенных) геотермальных систем (EGS), что может значительно повысить эффективность ($\times 10$) и мощность эксплуатации геотермальных ресурсов.

3.1 KMT и SC EGS

Концепция Krafla Magma Testbed (KMT) предполагает конвективные магматические системы (в виде сочетания даек и силлов) в качестве SC геотермальных резервуаров (Eichelberger и др., 2020), а тонкий проводящий слой между магмой и обычным продуктивным резервуаром рассматривается как целевой объем для эксплуатации SC геотермальных резервуаров (то есть добыча тепла планируется из проводящего слоя с помощью охлаждения и термически индуцированного гидроразрыва пласта).

Доказательной скважиной была IDDP-1, глубиной 2,1 км, пробуренная в 2008–2009 годах. IDDP-1 вскрыла магматическое тело с температурой более 900 °С в кальдере Крафла

(Исландия) (Fridleifsson et al., 2015). После интенсивного охлаждения с образованием проницаемой зоны за счет создания термоиндуцированной охлаждением трещиноватости в кристаллизованной магме (в процессе бурения было закачено 300 000 м³ холодной воды) и последующего восстановления температуры был проведен опытный выпуск (2 года, март 2010 – июль 2012). Эти испытания показали возможность эксплуатации скважины IDDP-1 с дебитом 40–50 кг/с при устьевом давлении 40–80 бар (перегретый пар с энтальпией 3200 кДж/кг), максимальной устьевой температуре 450 °С при давлении 140 бар. Это соответствует выработке 25–35 MWe, но для стабильной работы необходимо решить проблему очистки пара от SiO₂ (62 ppm), HCl (100 ppm) и S. Конструкция скважины IDDP-1: направляющая колонна – 13–3/8", внутри нее цементированная колонна – 9–5/8" – до глубины 1950 м, далее до глубины 2072 м – фильтровая колонна 9–5/8", затем в интервале 2072–2096 м – открытый ствол 12 1/4". Трассерные тесты (нафталинсульфонат, спирт, перфторуглерод) показали наличие гидравлической связи между IDDP-1 и эксплуатационными скважинами на месторождении Крафла, таким образом, по сути, реализована магматическая EGS. В 2012 году на скважине IDDP-1 произошел отказ устьевой задвижки и последующий разрыв эксплуатационной колонны при закачке холодной воды, поэтому было принято решение окончательно «задавить» ее холодной водой, а затем ликвидировать. Пример IDDP-1 наглядно показывает, что условия SC при продуцировании скважин переходят в обычные условия перегретого пара.

3.2 SC BBD

Японская концепция Beyond Boundary Ductile (BBD) предлагает гранитно-батолитовые системы в SC условиях как самодостаточные средне-проницаемые резервуары, отделенные от неглубоких традиционных эксплуатационных резервуаров из-за барьера осаждения кремнезема (Tsuchiya, 2020), а SC батолиты рассматриваются как целевой объем для эксплуатации геотермальных резервуаров SC.

Первой доказательной скважиной была WD-1a в Какконде (Muraoka et al, 1998). Эта скважина глубоко проникла в граниты при условиях SC, но показала там нулевую проницаемость. Следующей была IDDP-2 в Исландии, которая соответствовала условиям SC на глубине 4,5 км (Halldursdottir et al, 2020). Была предпринята попытка преобразования призабойной зоны в режиме CDM (конвективная нисходящая миграция) с использованием закачки холодной воды, и был достигнут показатель приемистости 3,1 кг/с/бар (Sigurdsson, 2020). Предполагается (Asanuma et al, 2020) получить несколько сотен ГВт из таких геотермальных SC резервуаров на северо-востоке Японии, имея в виду экспериментально доказанные значения средней проницаемости (в диапазоне от 1 до 10 мД) в таких резервуарах и новый технологический прорыв, ожидаемый к 2050 году. Примеры WD-1a и IDDP-2 показывают проблемы создания EGS в условиях SC с низкой проницаемостью.

3.3 Зоны магматического фракинга активных вулканов

Мы предлагаем в качестве целевого объема, где находятся продуктивные геотермальные резервуары, использовать объемы активного магматического фракинга (природные EGS), или пространство инъекций магмы в виде системы даек/силлов, выявленных по распределениям MEQ в структуре вулкана (Kiryukhin et al, 2018). В этом случае нет необходимости принудительно переводить их в EGS с помощью гидроразрыва, что уже сделано действующим вулканом. Более того, быстрое застывание магмы в тонких дайках и силлах может резко повысить проницаемость (на десять порядков), следуя механизмам индуцированной за счет охлаждения трещиноватости (Lavallee et al, 2020). Поступление тепла в эту систему постоянно происходит за счет инъекций магмы и притока флюидов из глубинных участков рассматриваемых систем.

3.3 EGS и HDR

В Германии осуществляется активное использование циркуляционных систем в естественных проницаемых разломах для получения геоэлектрической энергии, по существу

это EGS (Enhanced/Engineered Geothermal Systems) или HDR (Hot Dry Rock). Для извлечения теплоносителя необходимо использование погружных насосов LSP (Line Shaft Pump) с их установкой на глубинах до 300 м. Установленная мощность ГеоЭС 41,7 MWe, в том числе: Bruchsal 0,55 MWe (фактическая 0,44 MWe), Dürnrhaar 6,0 (6,0), Grünwald/Laufzorn 4,3 (4,3), Holzkirchen 3,6 (3,6), Insheim 4,8 (4,8), Kirchstockach 6,0 (6,0), Landau 3,0 (1,8), Sauerlach 5,0 (5,0), Taufkirchen 4,3 (4,3), Traunreut 5,5 (5,5). Отметим также прямое использование геотермальной энергии – 406,3 MWt установлено, в том числе 346,2 MWt благодаря использованию 382 тысяч тепловых насосов GSHP (типичная конфигурация: вода 8–12 °С, мощность 11,5 kWt).

В Австралии предпринята попытка создания искусственного EGS в Habanero с установленной мощностью бинарной ГеоЭС 1 MWe. С этой целью были пробурены четыре скважины глубиной до 4 204 м, которые вскрыли гранодиориты с температурой 250 °С (бассейн Купер) и осуществлен горизонтальный гидроразрыв (трещина 1 км × 1,5 км). Циркуляционная система выдержала испытание в течение 160 сут. в 2013 г (фактическая мощность 0,7 MWe), после чего проект был закрыт.

4. Возможности полного тепло- и электро- обеспечения Камчатки за счет геотермальных источников энергии

По результатам TOUGH2-моделирования эксплуатирующийся резервуар Мутновского геотермального месторождения (который составляет $\frac{1}{3}$ часть всего месторождения) способен обеспечить устойчивую продукцию 65–83 MWe, до 105 MWe при использовании бинарных ГеоЭС (Kiryukhin et al, 2018). Прогнозное моделирование и анализ экономической эффективности проекта эксплуатации Паратунского геотермального месторождения с погружными насосами показывает техническую осуществимость длительной (25 лет) эксплуатации и обеспечения систем централизованного теплоснабжения Петропавловска-Камчатского 1630 тыс. Гкал в год (216 MWt) (Kiryukhin et al, 2017, Кирюхин и Сугробов, 2019). Подключение к эксплуатации Верхне-Паратунского геотермального месторождения, являющегося аналогом Паратунского и обладающего сопоставимыми запасами геотермальной энергии – полностью решает проблему теплообеспечения основных потребителей Камчатки за счет геотермальных источников энергии.

5. Заключение

По данным восьми стран-лидеров по использованию геоэлектрической энергии (США, Филиппины, Индонезия, Япония, Италия, Мексика, Нов. Зеландия, Исландия) (Stefansson, 2005) получил линейную зависимость между количеством действующих вулканов и потенциальной электро-производительностью геотермальных месторождений. Эта зависимость показывает, что один активный вулкан в среднем обладает потенциалом для создания прилегающей гидротермальной системы, с фактической электро-производительностью 158 MWe. Если использовать 1322 вулкана в качестве количества доступных действующих вулканов мира, то мировой потенциал составит 209 GWe и 6000 GWt для прямого использования. К 2020 г установленная мощность ГеоЭС мира составляет 16 GWe, фактически вырабатываемая 10,9 GWe, прямое использование геотермальной энергии для отопления, бальнеологии и сельского хозяйства 32,3 GWt. (по данным WGC-2020+1). Таким образом, традиционные геотермальные ресурсы мира освоены на 5 % по электроэнергии и на 0,5 % по прямому использованию. Нетрадиционные геотермальные ресурсы (SCGR, EGS, SC BBD) могут существенно увеличить мировой потенциал геотермальной энергии по сравнению с оценками (Stefansson, 2005), но они находятся в целом на этапе научного изучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ_а «Магматический флюидный флюидный поток в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА–А20–120121090010–7.

Список литературы

1. *Кiryukhin A. B.* Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения / *A. B. Kiryukhin, B. M. Sugrobov* // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019650-65>.
2. *Кiryukhin A.B.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf
3. *Asanuma H.* Japanese Supercritical Geothermal Project for Drastic Increase of Geothermal Power Generation in 2050 / *H. Asanuma, T. Mogi, N. Tsuchiya et al.* // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
4. *Eichelberger J.* Magma-sourced Geothermal Energy and Plans for Krafla Magma Testbed / *J. Eichelberger, C. Carrigan, H. Ingolfsson et al.* // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
5. *Friðleifsson G.* IDDP-1 Drilled Into Magma – World’s First Magma-EGS System Created / *G. Friðleifsson, B. Pálsson, A. Albertsson et al.* // Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.
6. *Halldórsdóttir S.* Heat Transfer and Flow Paths in the Deep Part of the IDDP-2 Well in Reykjanes, SW Iceland / *S. Halldórsdóttir, E. Gudnason, I. Berre et al.* // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
7. *Kiryukhin A.V.* Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia / *A.V. Kiryukhin, L.A. Vorozheikina, P.O. Voronin et al.* // Geothermics. 2017. V. 70. pp. 47–61.
8. *Kiryukhin A.V.* Thermal-Permeability Structure and Recharge Conditions of the Mutnovsky High Temperature Geothermal Field (Kamchatka, Russia) / *A.V. Kiryukhin, A.Y Polyakov, O.O. Usacheva et al.* // J. of Volcanology and Geothermal Research. 2018. V. 356. pp. 36–55.
9. *Lavallée Y.* Thermal Manipulation of Magma Boundaries: Advancing Controls on Fluid Flow via the Krafla Magma Testbed (KMT) / *Y. Lavallée, A. Lamur, J. Kendrick et al* // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 Reykjavik, Iceland, April - October 2021
10. *Muraoka, H.* Deep geothermal resources survey program: igneous, metamorphic and hydrothermal processes in a well encountering 500 – at 3729 m depth, Kakkonda, Japan / *H. Muraoka, T. Uchida, M. Sasada et al.* // Geothermics. 1998. V. 27. pp. 507–534.
11. *Sigurðsson O.* Stimulation of the RN-15 / IDDP-2 Well at Reykjanes Attempting to Create an EGS System // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland. April - October 2021.
12. *Stefansson V.* World Geothermal Assessment: proc. World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24–29 April. 2005. pp. 1–6.
13. *Tsuchiya N.* Geological Model and Potential of Supercritical Geothermal Reservoir // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 Reykjavik, Iceland. April - October 2021.

High Temperature Silicified Zone as a Cap-Rock for Supercritical Geothermal Fluids

Noriyoshi Tsuchiya, Fajar Febiani Amanda

*Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University
Aramaki-aza-Aoba, 6-6-20, Sendai 980-8579, Japan
noriyoshi.tsuchiya.e6@tohoku.ac.jp*

The presence of supercritical fluids with temperatures of ~400–500 °C has been discovered from several active geothermal fields around the world indicated that there is available permeability in such a reservoir. To understand the geological and development models of a Supercritical («Beyond Brittle» and/or «Superhot») geothermal reservoir, geological survey of granite–porphyry system was performed. In order to reveal geological model, the granite–porphyry system provides useful information for creation of fracture clouds in supercritical geothermal reservoirs.

A high silicification zone that was observed at the top of granite intrusion. The earlier generation of quartz had the highest temperature and Ti content (516–640 °C; Ti = ~8–37 ppm) and was characterized by high luminescence and intensive brittle failure. The characteristics and temperature were similar to that quartz phenocryst in the crystalline granodiorite (531–793 °C; Ti = ~10–140 ppm), suggested being the relic of quartz phenocryst during the magmatic stage. The second and third generation of quartz had a weak to dark luminescence and lower temperature (375–465 °C) and was formed as overgrowth and a filling of microfractures and cavities of the earlier quartz generation. The quartz was generated during the earlier and higher temperatures of silicification, and therefore potential to be the cap–rock for a supercritical geothermal system.

Keywords: Supercritical Geothermal Fluids, Silicified Zone, Cap Rock, Geothermal Reservoir

Высокотемпературная кремненная зона как покровный слой для сверхкритических геотермальных флюидов

Нориёси Цучия, Фаджар Фебиани Аманда

*Высшая школа экологических исследований Университета Тохоку
Арамаки-аза-Аоба, 6-6-20, Сендай 980-8579, Япония*

На нескольких активных геотермальных полях по всему миру были обнаружены сверхкритические флюиды с температурами ~400–500 °C, что указывает на доступную проницаемость в таком резервуаре. Чтобы понять геологическую модель и модель развития сверхкритического («за пределами хрупкости» и/или «сверх-горячего») геотермального резервуара, было выполнено геологическое изучение системы гранит-порфир. При создании геологической модели система гранит-порфир предоставляет данные для создания облаков трещин в сверхкритических геотермальных резервуарах.

Зона высокой кремненности наблюдалась в кровле гранитной интрузии. Кварц более раннего поколения имел самую высокую температуру и содержание Ti (516–640 °C; Ti = ~8–37 ppm) и характеризовался высокой люминесценцией и интенсивным хрупким разрывом. Характеристики и температура были аналогичны фенокристаллу кварца в кристаллическом гранодиорите (531–793 °C; Ti = ~10–140 ppm), предположительно являвшимся реликтом фенокристалла кварца во время магматической стадии. Кварц второй и третьей генерации имел слабое или темное свечение и более низкую температуру (375–465 °C) и образовывался в результате зарастания и заполнения микротрещин и полостей более ранней генерации кварца. Кварц образовался во время более ранних и более высоких температур окварцевания, и, следовательно, потенциально может быть покровным слоем для сверхкритической геотермальной системы.

Ключевые слова: сверхкритические геотермальные флюиды, кремненная зона, покровная порода, геотермальный резервуар

Introduction

We are conducting supercritical geothermal project, and deep drilling project named as «Japan Beyond Brittle Project» (JBBP) The temperatures of geothermal fields operating in Japan range from 200 to 300 °C (average ~250 °C), and the depths range from 1000 to 2000 m (average ~1500 m). In conventional geothermal reservoirs, the mechanical behavior of the rocks is presumed to be brittle, and convection of the hydrothermal fluid through existing network is the main method of circulation in the reservoir. In order to minimize induced seismicity, a rock mass that is «beyond brittle» is one possible candidate, because the rock mechanics of «beyond brittle» material is one of plastic deformation rather than brittle failure. In that case, the main points for development of supercritical geothermal reservoir is to maintain high permeability of the reservoir even in beyond brittle condition.

Granite hosted supercritical geothermal reservoir has been discovered in Kakkonda Geothermal Field through the deep well (WD-1) which encounter a partly solidified granite with the fluid temperature of > 500 °C at the depth of > 3 km (Muraoka et al. 1998). It reveals the existence of deep-seated geothermal reservoir beneath the active geothermal field. However, it is challenging to determine the reservoir structure in such a deep environment. The granite-porphyry system recognized as the natural analog for this reservoir type presenting the condition at the near magma environment (Tsuchiya et al. 2016; Watanabe et al. 2017, 2019; Reinsch et al. 2017).

Geological background

Figure 1 shows schematic geological models of magma-hydrothermal regimes for processing in supercritical geothermal reservoirs associated with volcanic activities. Deep magma chamber, which is huge amount of heat source, supplies ascending magma, which is active magma chamber and direct heat source for supercritical and conventional geothermal reservoirs (Amanda et al., 2019). Before eruption, the supercritical resources can exist within granite-porphyry system under cap rock. After eruption, the cap rock is broken and breaching. An active magma can be upwelling through the cap rock and then shallow magma chamber and hydrothermal systems are enhanced within caldera underneath active volcano. Fournier (1999) already mentioned general model of transition from magmatic to epithermal conditions in a subvolcanic environment, where brittle to plastic transition occurs at 370 °C to 400 °C. In this paper, we describe high temperature silicification for generating cap rock for supercritical fluids upwelling and producing from magma chamber and mantle materials.

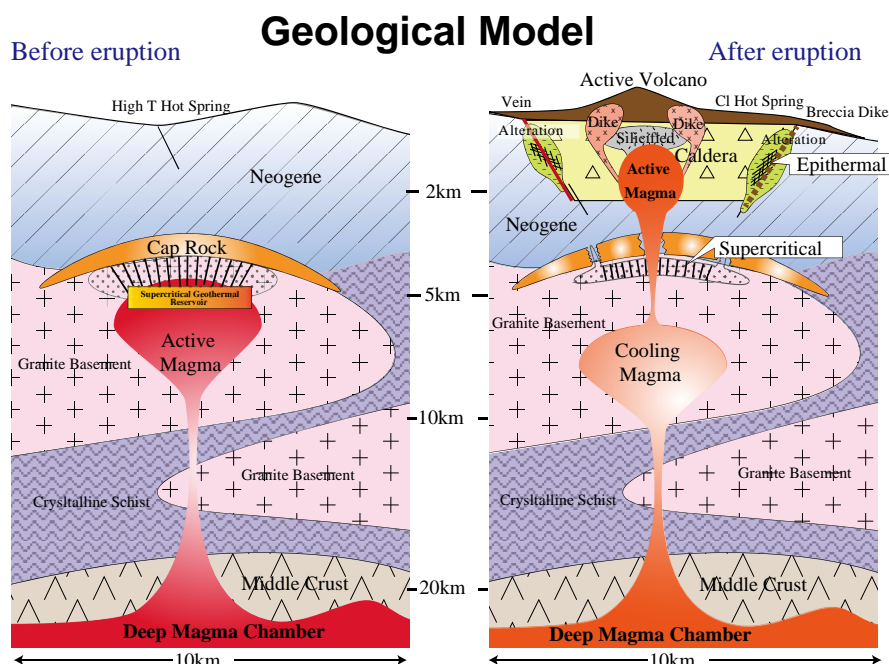


Figure 1 – Schematic geological model of supercritical geothermal reservoir

Supercritical Geothermal Resources

The granite porphyry system consisted of three main parts based on their textures (crystalline, porphyritic, and silicified). We could say that each part will represent the component of the supercritical geothermal system that depicts the distribution of geothermal components with depth. The thickness of each component and the geothermal gradient were approximated based on the geological map, geobarometry, and geothermometry. The geothermal gradient used in this model was 70 °C/km, derived from the temperature and pressure of crystalline granodiorite, assuming that the geothermal gradient was linear. The still molten-partly solidified crystalline granodiorites occupying the system's deepest (core part) appeared as the heat source in the geothermal system. The porphyritic granodiorite embodied the margin of the intrusion (shallower part). This unit intensively was breached by the vein and veinlets, especially as the host of the glassy vein, suggesting the occurrence of high fluid activity, which mimicked the supercritical geothermal reservoir. The accumulation of silica at the top of the intrusion as the silicified zone was potentially the cap-rock of the supercritical geothermal system (Amagai et al., 2019).

The high-temperature silicification stage was represented by the silicified granite. Fluid inclusion and Ti contents showed that this quartz has formed at a similar temperature (~375–465 °C), revealing the pressure assumption for fluid inclusion analysis was relevant ~100–200 MPa or 4–7.5 km (lithostatic gradient of 2.7 g/cm³ crustal density). This depth also coincided with the silica solubility minimum (644 mg/kg H₂O); hydrostatic pressure of 63.7 MPa) at ~6.5 km for the geothermal gradient of 70 °C/km (according to Akinfiyev and Diamond, 2009). The interval for the caprock was placed at a depth of 6.5–7 km. If we assumed the supercritical reservoir was located just below the cap rocks, the top of the reservoir was around the depth of ~7 km. The thickness of this layer was ~1 km, which made the reservoir at ~7–8 km depth and located at the margin of the granodiorite body (the vein rich-porphyritic-granodiorite), right above crystalline granodiorite in which also coincides with the prior result by Tsuchiya et al. (2016) derived from P–T evolution of a supercritical geothermal reservoir in the study area (at 500–550 °C and ~200 MPa). Therefore, we can assume that the crystalline granodiorite as the heat source was placed at a depth of 8 km and still existed to the depth of 11 km (Fig. 2), which corresponded to the results of Al–in–Hbl geobarometry of crystalline granodiorite (~300 MPa).

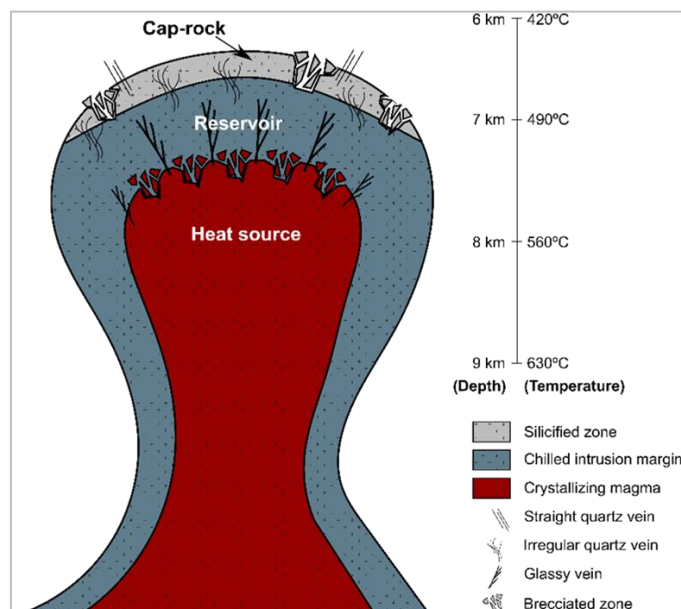


Figure 2 – A schematic illustration of the supercritical geothermal structure presents a spatial distribution of the components and veins for the geothermal gradient of 70 °C/km. A heat source is a crystalline granodiorite placed at ~8–11 km (~200–300 MPa, ~531–793 °C). The reservoir is located at the margin of the granodiorite body (the vein rich–porphyritic–granodiorite) of ~7–8 km depth (~175–200 MPa, ~500–560 °C). The cap–rock is placed at a depth of 6.5–7 km (~175 MPa, ~430 °C). The high–temperature hydrothermal quartz (~400 °C) is formed during self–sealing and becomes the caprock for the supercritical geothermal system

Conclusion

The granite porphyry system consisted of three main parts based on their texture (the crystalline, porphyritic, and silicified). The granite–porphyry can be used as a natural analog for the supercritical geothermal structure. The structure was given as the crystalline granodiorites as the heat source according to that placed at ~8–11 km depth (~200–300 MPa according to Al–in–Hbl geobarometry) with a temperature of ~531–793 °C (Ti–in–Qtz geothermometry). Porphyritic granodiorite breached by the vein and veinlets existed as the supercritical geothermal reservoir at ~7–8 km (~175–200 MPa). Silicified zone granite was carried out as the caprock right above the reservoir at ~6.5–7 km depth (~175 MPa) with a temperature of ~430 °C from Ti–in–Qtz geothermometry. The high–temperature hydrothermal quartz was formed during self–sealing and become the cap–rock for a supercritical geothermal system, then accompanied by the formation of an irregular quartz vein. The straight quartz vein followed the hydrothermal breccia marked the transitions of lithostatic to hydrostatic pressure. The highly silicified zone on top of granodiorite intrusion in granite–porphyry systems provide valuable evidence of cap rocks and thus extends a suitable natural analog of supercritical geothermal systems.

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) and JSPS (Japan Society for the Promotion of Science: Japan-Russia Research Collaboration) financially supported the supercritical geothermal project. We would like to say thanks to all members of the research project. The reported study was funded by RFBR and JSPS according to the research project 21–55–50003 «Magma fracking and Fluid Flows in Volcanic Structures»

References

1. *Akinfiyev N.N.* A simple predictive model of quartz solubility in water-salt-CO₂ systems at temperatures up to 1000 °C and pressures up to 1000 MPa / *N.N. Akinfiyev, L.W. Diamond // Geochimica and Cosmochimica Acta.* 2009. 73. 1597–1608. DOI: 10.1016/j.gca.2008.12.011
2. *Amagai* Silica nanoparticles produced by explosive flash vaporization during earthquakes / *Amagai, et al. // Scientific Reports.* 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-46320-7.
3. *Amanda* Evaluation of Caldera Hosted Geothermal Potential during Volcanism and Magnetism in Subduction System, NE Japan / *Amanda et al. // Geofluids.* 2019. DOI: 10.1155/2019/3031586.
4. *Fournier R.O.* Hydrothermal Processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic–epithermal environment. / *R. O. Fournier // Econ. Geol.* 1999. 94. 1193–1211.
5. *Muraoka, H.* Deep geothermal resources survey program: Igneous, metamorphic and hydrothermal processes in a well encountering 500 °C at 3729 m depth, Kakkonda, Japan. / *H. Muraoka, T. Uchida, M. Sasada et al. // Geothermics.* 1998. 27. 507–534. DOI: 10.1016/S0375-6505(98)00031-5
6. *Reinsch, T.* 2017. Utilizing supercritical geothermal systems: a review of past ventures and ongoing research activities. / *T. Reinsch, P. Dobson, H. Asanuma et al. // Geotherm. Energy* 2017. 5. 1–25. DOI: 10.1186/s40517-017-0075-y
7. *Tsuchiya* Supercritical geothermal reservoir revealed by a granite–porphyry system / *Tsuchiya et al. // Geothermics.* 2016. 63. 182–194. DOI: 10.1016/j.geothermics.2015.12.011.
8. *Saishu* The significance of silica precipitation on the formation of the permeable–impermeable boundary within Earth’s crust / *Saishu, et al. // Terra Nova.* 2014. 26. 253–259. DOI: 10.1111/ter.12093.
9. *Watanabe* Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust, / *Watanabe et al. // Nature Geoscience.* 2017. DOI: 10.1038/NGEO2879.

10. *Watanabe* Cloud-fracture networks as a means of accessing superhot geothermal energy /
Watanabe et al. // Scientific Reports. 2019. DOI: 10.1038/s41598-018-37634-z.

УДК 551.242:553.4

Gold in hydrothermal-magmatic systems: The colloidal concept

Vladimir Belousov¹, Galina Koroleva², Olga Khubaeva¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
bvi36@yandex.ru*

²*Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia
korol@igc.irk.ru*

Gold is a key industrial element in understanding the processes of hydrothermal ore formation. Its transport and deposition are controlled by colloid chemistry. The main process is the sorption activity of silica gel-sulfide complexes. They have a negative charge and can attach metal cations, including noble metals. Ca-silica gel has a much higher exchange capacity (50–100 times higher) than H-silica gel and exchanges relatively easily and reversibly for other cations. The transformation of Ca-silica gel into a form with a lower sorption capacity is most likely caused by boiling thermal waters with CO₂ degassing. Sulfide colloids are also capable of sorbing noble metals.

Keywords: colloids, silica gel, sulfides, ore formation, gold

Золото в гидротермально-магматических системах: коллоидная концепция

В.И. Белоусов¹, Г.П. Королева², О.Р. Хубаева¹

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

²*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН Иркутск, ул. Фаворского, д.1 «А»*

Золото является ключевым промышленным элементом в понимании процессов гидротермального рудообразования. Его перенос и отложение контролируется химией коллоидов. Главным процессом является сорбционная активность силикагель-сульфидного комплекса. Они имеют отрицательный заряд и способны присоединять катионы металлов, в том числе и благородные металлы. Са-силикагель обладает значительно большей обменной ёмкостью (в 50–100 раз) по сравнению с Н-силикагелем и сравнительно легко и обратимо обменивается на другие катионы. Трансформация Са-силикагеля в форму с меньшими сорбционной способностью, наиболее вероятно, вызывается кипением термальных вод с дегазацией CO₂. Коллоиды сульфидов также способны сорбировать благородные металлы.

Ключевые слова: коллоиды, силикагель, сульфиды, рудообразование золото

Введение

В некоторых геотермальных системах золото встречается в отложениях горячих источников Вайотапу, Новая Зеландия, Йеллоустоунского Национального парка и Стимбоат-Спринг, в осадках, извлекаемых термальных вод скважинами, содержащих промышленные содержания золота, в отложениях горячих источников и скважин Паужетской месторождения термальных вод (Королёва, 1993). Особый интерес вызывают золоторудные месторождения в Банно-Паратунском геотермальном районе. Интерпретация переноса золота в гидротермально-магматических системах областей современного вулканизма основывается на предположении, что только сероводород (HS⁻) и хлорид (Cl⁻) могут образовывать стабильные комплексы с золотом Au⁺. То есть современные взгляды

образования золоторудных месторождений базируются на концепции, что рудоносные флюиды являются истинными растворами.

Коллоидная гипотеза образования гидротермальных месторождений золота началась с публикации Линдгрена В. (Lindgren, 1915).

Стратовулканы и гидротермальные системы

Эпитермальные и порфировые месторождения золота связаны со стратовулканами и связанными с ними гидротермальными системами районов развития бимодального вулканизма (рис. 1). На полях трещинного вулканизма образуются многоканальные вулканы с магматическими очагами на малых глубинах. Они передают тепло, генерируемое, как в мантии, так и в земной коре. Тепло магматических очагов поддерживает стабильный режим теплопередачи в стратовулканах и гидротермальных системах. Продолжительность активности таких очагов ограничена во времени и пространстве (Белоусов, 1978). Взаимодействие термальных вод различного формирования с вмещающими породами продуцирует силикагель и глины, участвующие в образовании газо-водоупорных литологических экранов. Под ними аккумулируются газы (Kiryukhin et al., 2018). CO₂ оказывает воздействие, как на подъём термальных вод за счёт газлифта, так и присутствие Ca²⁺ в растворе. Экраны также выполняют роль теплоизоляторов. Ледники на вулканах дополняют воздействие литологических экранов на термальный режим (Белоусов, 1978). Такой процесс изменения теплового режима приводит к частичному плавлению и спеканию.

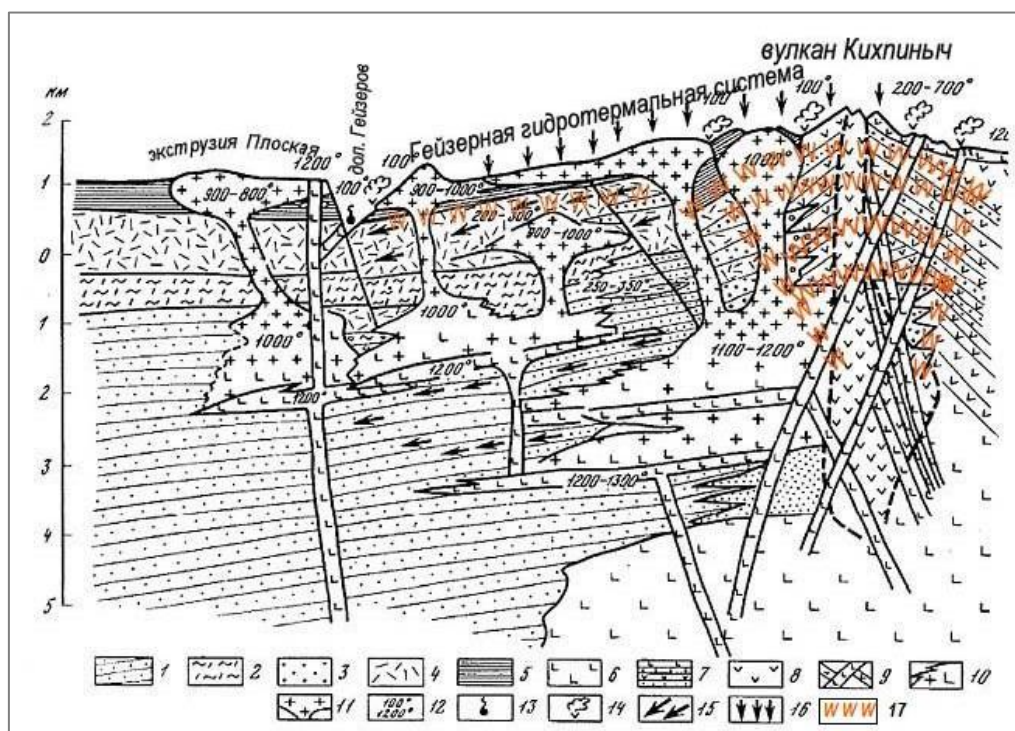


Рисунок 1 – Схематический разрез стратовулкана Кихпиньч и Гейзерной гидротермальной системы.

1 – тонкообломочные вулканогенно-осадочных толщ; 2 – игнимбриты;

3–4 – вулканогенно-осадочные толщ; 5 – зоны окремненных толщ; 6 – базальты; 7–8 – лавы и пирокластическая;

9 – дайки и силлы базальта; 10 – базальтовые расплавы и расплавы анатексиса; 11 – кислые экструзии; 12 – температура; 13 – восходящие термальные источники; 14 – парогазовые струи;

15 – движения термальных вод; 16 – фильтрация метеорных вод; 17 – кислотно-изменённые породы

Силикагель-сульфидный комплекс – лиганд

Потапов В.В. (2002), считает, что содержание кремнезёма в термальных водах соответствует состоянию насыщения, а при понижении температуры перенасыщения и образования силикагеля. Янагизава и другие (Yanagisawa et al., 1995) показали, что в процессе непрерывного взаимодействия воды с алюмосиликатными минералами и вулканическими стеклами от выщелоченного слоя отслаиваются гидросиликатные цепочки и

слои виде мицелл силикагеля. Образование силикагеля контролируется химией коллоидов. Силикагели могут быть водородными и катион-замещёнными (Рубаник, 1971). Они имеют отрицательный заряд, и способны присоединять катионы металлов, в том числе и благородных металлов. Са-силикагель обладает значительно большей адсорбцией (в 50–100 раз) по сравнению с Н-силикагелем. Ca^{2+} сравнительно легко и обратимо обменивается на другие катионы. Выделение CO_2 нарушает карбонатное равновесие и силикагель осаждает избыток золота и других металлов. Кварц-карбонатные золоторудные жилы свидетельствуют о наличии такого процесса в золоторудных месторождениях Банно-Паратунского геотермального района.

Предполагается, что коллоиды сульфидов образуются в результате взаимодействия металлов, выщелоченных ультра-кислыми ($\text{pH} < 2$) из вулканических алюмосиликатных пород с глубинным сероводородом (H_2S). Они также заряжены отрицательно и защищенные от коагуляции силикагелем способны сорбировать и транспортировать благородные металлы. Коллоиды сульфидов отлагаются с адсорбированными металлами.

Механизмы отложения золота

Гидротермальные системы стратовулканов аналогичны артезианским склонам. Когда водоупорный горизонт, подстилающий ультра-кислые воды поверхностного формирования, нагруженные металлами, нарушается землетрясениями и другими событиями, то эти рудоносные флюиды обрушаются на горячую интрузию. В результате образуется система хаотических трещин и происходит длительное кипение и образование рассола. Рассолы промываются последующими потоками нагретой углекислой метеорной водой с Са-силикагелем, который выборочно сорбирует золото и катионы других металлов. Часть этих растворов в процессе кипения на интрузиве образует штокверки (порфировые месторождения), а часть этих термальных вод в потоках артезианского склона. Высокотемпературные потоки артезианских склонов подвергаются ареальной диффузионной дегазации и бурному кипению в разломах с потерей CO_2 (Kiryukhin, Karpov, 2020) и отлагают рассеянное золото в окварцованных породах, и золоторудных жил (эпитермальные месторождения) (рис. 2). По мере остывания содержание силикагеля уменьшается, что приводит к отложению сульфидов с адсорбированным золотом.

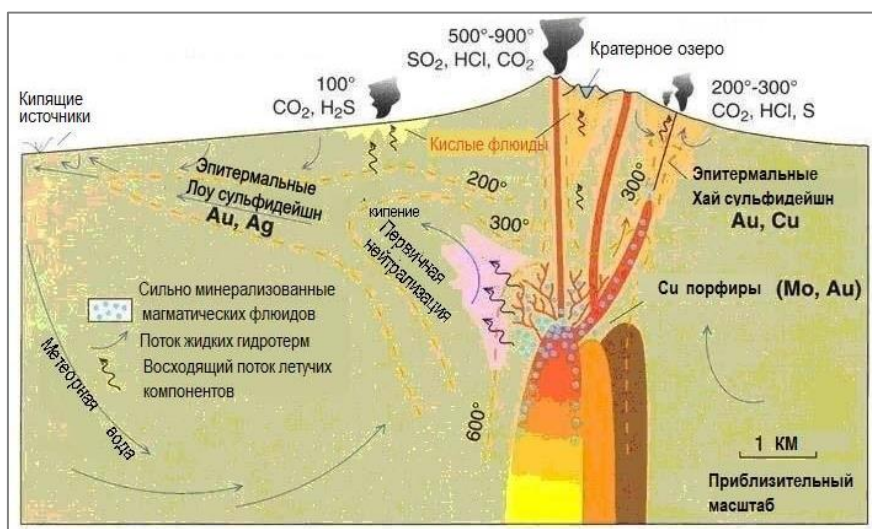


Рисунок 2 – Схематический поперечный разрез стратовулкана с гидротермальной системой и неглубоким магматическим очагом. Показаны места формирования порфировых и эпитермальных месторождений (Hedenquist, Lowenstern, 1994)

Артезианские гидротермальные бассейны в межгорных впадинах представляют собой очагами разгрузки высокотемпературных вод артезианских склонов. Они образуются в условиях островных вулканических дуг. Насыщенные кремнезёмом высокотемпературные воды взаимодействуют с морской водой отлагают халцедон и аморфный кремнезём, образуя

водоупорный горизонт мощностью до ~2 км. Такой горизонт обладает свойствами теплоизоляторов. Мощные ледники на вулканах ограничивают подземный сток поверхностных вод и, обладая свойствами теплоизолятора, способствуют аккумуляции тепла достаточного для частичного плавления высококремнистого материала. Образуются спекшиеся туфы, игнмбриты и кислые расплавы. Как и в случае артезианских склонов внедрение магматических тел, может создавать систему разломов, которая нарушает герметизацию рудоносного водоносного горизонта. Предполагается, что кварц-карбонатные золотоносные жилы месторождений Южно-Камчатского рудного поля образованы такими процессами. Модель гидротермального артезианского бассейна, возможно, полезна в решении проблемы образования жильные золоторудные месторождения, связанные с интрузивами (Sillitoe, Thompson, 1998).

Заключение

Предложенная коллоидная концепция базируется, как на реальных фактах, полученных из наблюдений современных гидротермально-магматических систем, так и на экспериментальных исследованиях. Авторы, относясь ответственно к предлагаемой интерпретации, понимают, что она может быть только стимулом к продолжению дискуссии о происхождении золоторудных гидротермальных месторождений.

Полный вариант интерпретации представлен на сайте Белоусова В.И. (<https://sites.google.com/site/ignimbritykalderyigidrotermny/zoloto-v-gidrotermalno-magmaticeskih-sistemah>).

Список литературы

1. *Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 176 с.
2. *Королёва Г.П.* Золото и другие рудные элементы в гидротермальной системе / *Г.П. Королева, И. С. Ломоносов, Ю. М. Стефанов* // Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. С. 253–280.
3. *Потапов В.В.* Разработка способов извлечения кремнезёма из высокотемпературного гидротермального теплоносителя : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Петропавловск-Камчатский, 2002. 386 с.
4. *Рубаник С.К.* Избирательная сорбция катионов силикагелями и природа силоксановых связей: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидат химических наук. Киев, 1971. 28 с.
5. *Hedenquist J.W.* The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits / *J.W. Hedenquist, J.W. Lowenstern* // Nature. august 1994. 370 No 6490 18. pp. 519–527.
6. *Lindgren, W.* Geology and mineral deposits of the National mining district, Nevada: // U.S. Geological Survey Bulletin. 1915. 601. 58 p.
7. *Sillitoe R.H.* Intrusion-Related Vein Gold Deposits: Types, Tectono-Magmatic Settings and Difficulties of Distinction from Orogenic Gold Deposits. / *R.H. Sillitoe, J.F.H. Thompson* // Resource Geology. 1998. V. 48, № 2. pp. 237–250.
8. *Yanagisawa N.* Depth profiles of different water species for the hydration of silica glass under supercritical conditions by means of micro. FT – IR. / *N. Yanagisawa, K. Fujimoto, Y. Kurato et al.* // Water Rock. Balkema, Rotterdam, 1995. pp. 131–134.
9. *Kiryukhin A.* Geysers Valley CO₂ Cycling geological Engine (Kamchatka, Russia) / *A. Kiryukhin, V. Sugrobov. E. Sonnenthal* / Geofluids Journal. 2018. 17 p. <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/aip/1963618/>.
10. *Kiryukhin A.* A CO₂-Driven Gas Lift Mechanism in Geyser Cycling (Uzon Caldera, Kamchatka) / *G. Karpov* // Geosciences. 2020. Vol. 10. No. 5. P. 180. DOI: 10.3390/geosciences10050180

Formation of Carbon Dioxide Flow on the Territory of Northeast Asia

Alexey Plyusnin

Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

plyusnin@ginst.ru

The formation of carbonic mineral and nitrogen thermal waters is associated with the long-term processes of granite formation in the depths of this territory, which are manifested on the surface by the formation of vaulted uplifts. On the territory under consideration, nine areas of the compact arrangement of mineral and thermal water sources have been identified, in which 107 carbonic mineral springs and 108 nitrogen thermal water springs are combined. It is shown that carbon dioxide is released during the crystallization of granites in the form of a fluid with oxidizing properties and capable of transporting substances that are difficult to dissolve under normal conditions. The features of the formation of rare earth elements composition in the waters of this region are considered. The presence of high contents of iron, zirconium, niobium in carbonic mineral waters is explained.

Keywords: granite formation, vaulted uplifts, nitrogen therms, mineral waters, fluids, europium, cerium

Формирование потока углекислого газа на территории северо-восточной Азии

А.М. Плюснин

Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Образование углекислых минеральных и азотных термальных вод связано с длительно протекающими в недрах этой территории процессами гранитообразования, очаги которых проявляются на поверхности сводовыми поднятиями. На рассматриваемой территории выделено девять областей компактного расположения источников минеральных и термальных вод, в которых объединено 107 водопроявлений углекислых минеральных и 108 азотных термальных вод. Показано, что углекислый газ выделяется при кристаллизации гранитов в виде флюида, обладающего окислительными свойствами и способного переносить в своем составе труднорастворимые в обычных условиях вещества. Рассмотрены особенности формирования состава редкоземельных элементов в водах этого региона. Объяснено присутствие в углекислых минеральных водах высоких содержаний железа, циркония, ниобия.

Ключевые слова: гранитообразование, сводовые поднятия, азотные термы, минеральные воды, флюиды, европий, церий

Введение

Углекислые минеральные воды, в основном, располагаются в тектонически активных областях, характеризующихся недавней и современной вулканической деятельностью. Для этих районов установлена генетическая связь углекислого газа с вулканическими образованиями. В районах современного вулканизма углекислый газ присутствует в газовых эманациях в огромных количествах, он задает условия для протекания многих геологических и геохимических процессов. Эндогенный поток углекислого газа существует и в центральных частях континентов, где имеются многочисленные проявления углекислых минеральных вод, которые явно не связаны с современным вулканизмом. На этой территории в пределах России, Монголии, Китая и Северной Кореи выявлено несколько сот источников термальных и минеральных вод. Генезис углекислого газа на рассматриваемой территории до сих пор не нашел своего логического объяснения.

Геологические условия образования потока углекислого газа

Территория характеризуется широким распространением гранитоидов, которые, в основном, сформировались в палеозое. Схлопывание Монголо-Охотского океана привело к утолщению коры, а сохранивший свою активность под континентальными плитами срединно-океанический хребет способствовал внедрению базитовых интрузий в нижние горизонты коры, обеспечивая совместно с мантийными флюидами ее прогрев и плавление (Ярмолюк и др., 1997; Складов и др., 1997). В присутствии гранитных расплавов происходило крупномасштабное растяжение в нижних слоях земной коры, а на поверхности формировались купола. Гранитообразование продолжалось на протяжении нескольких сот миллионов лет и не прекратилось до сих пор.

Процесс кристаллизации гранитных массивов сопровождается интенсивным отделением флюидов, в составе которых доминируют вода и углекислый газ (Когарко, Рябчиков, 1978). По нашим оценкам при кристаллизации массива гранитов объемом 2000 км^3 при содержании углекислого газа 1 масс % выделится около 10^{13} м^3 (десять триллионов кубических метров) CO_2 . Транспорт углекислого газа от кристаллизующегося массива к поверхности земли происходит по открытым разрывным нарушениям. В пределах сводов они образуются при вертикальных и горизонтальных тектонических движениях, связанных со всплыванием молодых интрузивных массивов. В результате этих движений покровная, сложенная палеозойскими гранитами, разбивается многочисленными разломами. Первоначально сеть разломов развивается вблизи поверхности (3–5 км), в них проникают атмосферные и поверхностные воды, нагреваются и затем разгружаются в виде азотных термальных источников. Постепенно в результате выветривания купола разрушаются, мощность гранитного слоя уменьшается, и тектонические разломы пронизывают оставшуюся покровную палеозойских гранитов до кристаллизующейся интрузии. По этим разломам начинают перемещаться к поверхности флюиды, они встречаются с вадозными водами, передают им переносимые от интрузии летучие компоненты и разгружаются в виде источников углекислых минеральных вод.

Углекислые минеральные и азотные термальные воды на рассматриваемой территории локализуются обособленными группами, разделенными сотнями и тысячами километров. Геолого-гидрогеологические условия разгрузки минеральных вод в них разные, так как они располагаются в различных природно-климатических зонах и связаны с куполами, сформировавшимися в разное время и находящимися на разных стадиях развития. Эти обособленные участки расположения азотных термальных и углекислых минеральных вод назовем гидроминеральными областями, имея в виду единые характерные для каждой из них геолого-гидрогеологические условия формирования ресурсов и химического состава вод. В этих гидроминеральных областях объединяются источники и углекислых минеральных и азотных термальных вод. Определяющим фактором их объединения является пространственная приуроченность к определенному сводовому поднятию. Нами на рассматриваемой территории выделено девять гидроминеральных областей, в которых объединено 107 источников углекислых минеральных и 108 азотных термальных вод. В действительности количество водопроявлений минеральных вод на этой территории значительно больше, многие из них еще не достаточно изучены.

Геохимические особенности минеральных вод

Рассмотрим поведение в углекислых минеральных водах химических элементов, содержание которых, по нашим представлениям, связано с эндогенным потоком углекислого газа. Проведем сравнительный анализ их концентрации с азотными термальными водами, так как химический состав тех и других формируется в пределах распространения гранитоидов.

Для углекислых минеральных вод характерны очень высокие содержания редкоземельных элементов. Концентрация этих элементов превышает фоновые значения на несколько математических порядков. В литературе укоренилось представление, что это связано с тем, что их миграционной способности благоприятствует кислая среда и образование карбонатных комплексных соединений. При этом считается, что они поступают

из пород, с которыми контактируют минеральные воды. Если это так, то спектр распределения редкоземельных элементов в водах должен соответствовать спектру их распределения во вмещающих породах. А если они привносятся потоком флюида углекислого газа от кристаллизующегося интрузивного массива, то их спектр будет отличаться от пород в месте разгрузки источника.

Рассмотрим распределение редкоземельных элементов в углекислых минеральных водах и во вмещающих их породах (Челноков, Харитонов, 2008). Конфигурация спектра распределения редкоземельных элементов во вмещающих породах и в водах совершенно разные (Рис. 1). В водах наблюдаются более высокие содержания тяжелых редкоземельных элементов по сравнению с легкими, а во вмещающих породах наоборот.

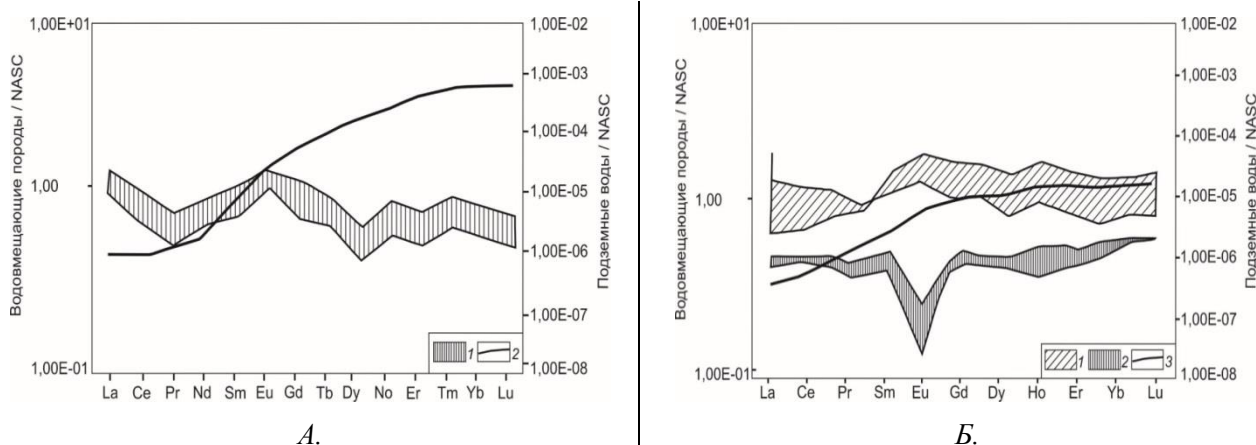


Рисунок 1 – Спектр распределения редкоземельных элементов во вмещающих породах и углекислых минеральных водах месторождений Горноводное (А) и Фадеевское (Б). Условные обозначения: А. 1 – вмещающие породы, 2 – углекислые минеральные воды. Б. 1 – выветрелые вмещающие породы, 2 – неизменные вмещающие породы, 3 – углекислые минеральные воды

Такое поведение редкоземельных элементов характерно для большинства холодных углекислых минеральных вод северо-восточной части Азии. В отличие от них спектр распределения редкоземельных элементов в азотных термальных водах соответствует спектру распределения их во вмещающих горных породах. Щелочные условия среды в азотных термальных водах определяют минимальные концентрации этих элементов в растворе. Это можно видеть по распределению содержания лантаноидов в азотных и углекислых водах водопроявлений Хэнтэй-Даурского свода (Рис. 2А). В азотных термальных водах ярко выражен европиевый минимум, который характерен для кислых интрузивных пород (Рис. 2А).

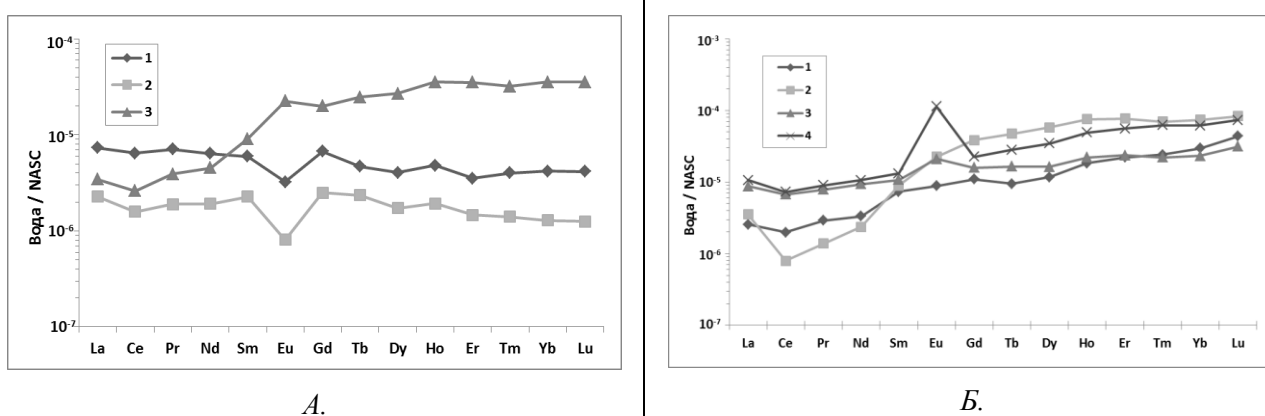


Рисунок 2 – Распределение редкоземельных элементов в азотных термальных водах и углекислых водах Хэнтэй-Даурского свода (А.) и в водах Забайкальской гидроминеральной области (Б). Условные обозначения: (А) азотные термальные источники Естий (1), Талачинский (2), скважина на месторождении углекислых минеральных вод Ямаровка (3); (Б) Молоковка (1), Дарасун (2), Кука (3), Шиванда (4)

Европий присутствует в растворах и расплавах в степени окисления +3 и +2. Европий +2 может входить в решетку плагиоклаза вместо кальция, имеющего такую же степень окисления, и, таким образом, удаляться из расплава. Поэтому оставшаяся часть расплава, при кристаллизации которого образуются граниты, обеднена европием. Азотные термальные воды наследуют это распределение редкоземельных элементов при взаимодействии с гранитами. А в углекислых минеральных водах наблюдается европиевый максимум. Они обогащаются редкоземельными элементами, которые привносятся флюидом CO_2 . А он отделяется от расплава раньше, еще до кристаллизации плагиоклаза, поэтому мы и наблюдаем европиевый максимум. К тому же при температуре выше 200°C европий +2 доминирует над европием +3, а его сорбционная способность меньше, чем у всех остальных легких редкоземельных элементов (Bau M., 1991). Церий также может присутствовать в растворе и расплаве в двух степенях окисления +3 и +4. Он может окисляться в условиях поверхности Земли и выводиться из раствора путем сорбции или путем образования двуокси церия. Процесс окисления церия, вероятно, происходит на всех изученных месторождениях Забайкалья, так как в их водах фиксируется отрицательная цериевая аномалия (Рис. 2Б). Но разгрузка вод на этих месторождениях происходит в восстановительных условиях, тогда где же происходит окисление церия до степени окисления +4. Нам представляется, что отрицательная цериевая аномалия в углекислых минеральных водах связана с окислительным воздействием флюида воды и углекислого газа. Эта их особенность установлена экспериментальными работами при высоких значениях давления и температуры (Востриков и др., 2012). В углекислых минеральных водах установлены очень высокие содержания железа, марганца, хрома, циркония и ниобия. Их высокая концентрация также может быть объяснена воздействием флюидов воды и углекислого газа, отделяющихся от кристаллизующихся интрузивов. Содержание железа в углекислых минеральных водах коррелирует с содержанием сульфат-иона. Наиболее вероятным источником железа в этих водах выступают сульфиды железа, окисление сульфидной серы в этом случае происходит под воздействием сверхкритической H_2O . Воздействие флюида $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ приводит к образованию наночастиц моноклинного ZrO_2 и WO_3 . Образующийся высший окисел циркония имеет амфотерные свойства. При неполном гидролизе образуется ион цирконила $[\text{ZrO}]^{2+}$, который экстрагируется флюидом углекислого газа и в последующем попадает в углекислые минеральные воды. Аналогичным образом, вероятно, мигрирует ниобий, так как он обнаруживается в газовой-жидких включениях совместно с цирконием.

Исследование выполнено по проекту АААА–А21–121011890033–1.

Список литературы

1. *Востриков А.А.* Образование горючих газов при взаимодействии вольфрама и циркония со сверхкритическим флюидом $\text{H}_2\text{O} / \text{CO}_2$ / *А.А. Востриков, А.В. Шишкин, О.Н. Федяева и др.* // Сверхкритические флюиды. Теория и практика. 2012, № 4. С. 95–103.
2. *Когарко Л.Н.* Летучие компоненты в магматических процессах / *Л.Н. Когарко, И.Д. Рябчиков* // Геохимия. 1978. № 9. С. 1293.
3. *Скляр Е.В.* Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа / *Е.В. Скляр, А.М. Мазукабзов, А.И. Мельников*; ред. *Ф.А. Летников*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ. 1997. 182 с.
4. *Челноков Г.А.* Углекислые минеральные воды юга Дальнего Востока России / *Г.А. Челноков, Н.А. Харитонова*; ред. *В.В. Кулаков*. Владивосток: Дальнаука, 2008. 165 с.
5. *Ярмолюк В.В.* Ангаро-Витимский батолит: к проблеме геодинамики батолитообразования в Центрально-Азиатском складчатом поясе / *В.В. Ярмолюк, В.И. Коваленко, А.Б. Котов и др.* // Геотектоника. 1997. Т. 6, № 5. С. 18–36.
6. *Bau M.* Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction state of europium / *M. Bau* // *Chemical Geology*. 1991. V. 93. pp. 219–230.

Budget of Slab-derived Water in Arc Crust: Constraints from Crust-Melt Reaction Zones and Fossil Caldera Differentiation Processes

Masaoki Uno, Noriyoshi Tsuchiya

*Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Aza-aoba 6-6-20, Aramaki, Aoba, Sendai
980-8579 JAPAN
uno@geo.kankyotohoku.ac.jp*

Water budget in the arc crust is of critical importance for volcanic activities, rheology, and geothermal energy budget of the arc crust. In this study, budget of H₂O within the crust were constrained from crust-melt reaction zones and melt inclusions in fossil calderas. The granulite-hosted crust-melt reaction zones in Sør Rondane Mountains, East Antarctica (0.5 GPa, 700 °C Uno et al., 2017) revealed that the flux of water from the dike to the crust is limited to ~4.2 kg/m² dike surface. It is suggested that most of the H₂O liberated from the granitic dike (more than 65 %) was transported as excess fluid toward the upper crust through the dike-related fractures. The subsequent budget of H₂O transported to upper crust are estimated from fossil calderas distributed in NE Japan arc. The analyses of melt inclusions in quartz suggest that their magma chambers existed at the depth of 1–12 km with dacite–rhyolite melt composition, the H₂O content of melt ranges 3–7 wt% (Suzuki et al., 2017; Amanda et al., 2019). Based on these constraints, the flux of H₂O supplied into the caldera cluster is estimated as 0.4–2.2 × 10⁵ kg/yr, or 2–11 t/yr/m for a unit along arc distance. These results suggest that most of H₂O liberated from subarc magma (4 wt% H₂O; ~13 t/yr/m; Kimura and Nakajima, 2014) do not react with surrounding crust, and transport upwards to magma chambers in upper crust, and get saturated at ~8 km (5–6 wt% H₂O melt) and liberate the H₂O in the rate of 2–11 t/yr/m.

Keywords: water budget, arc crust, fossil caldera, reaction zone, melt inclusion, supercritical geothermal reservoir

Баланс воды в зоне субдукции: ограничения, обусловленные зонами реакции кора-расплав и процессами дифференциации реликтовых кальдер

Масаоки Уно, Норие́си Цучия

*Университет Тохоку, Высшая школа экологических исследований, Сендай, Япония,
Арамаки-аза-Аоба, 6-6-20, Сендай 980-8579, Япония*

Баланс воды в коре зоны дуги имеет решающее значение для вулканической деятельности, реологии и баланса геотермальной энергии. В данном исследовании баланс H₂O в коре зоны дуги был ограничен зонами реакции кора-расплав и расплавленными включениями в реликтовых кальдерах. Гранулитовые зоны реакции кора-расплав в горах Сёр-Рондане, Восточная Антарктида (0,5 ГПа, 700 °C Uno et al., 2017) показали, что поступление воды из дайки в кору ограничено ~4,2 кг/м² поверхности дайки. Предполагается, что большая часть H₂O, высвобожденной из гранитной дайки (более 65 %), была перенесена в виде избыточного флюида в верхнюю кору через связанные с дайкой трещины. В последствии баланс H₂O, перенесенной в верхнюю кору, оценивался по реликтовым кальдерам, распространенным в северо-западной Японской дуге. Анализ расплавленных включений в кварце свидетельствует о том, что их магматические камеры с дацит-риолитовым составом расплава существовали на глубине 1–12 км, содержание H₂O в расплаве составляет 3–7 мас. % (Suzuki et al., 2017; Amanda et al., 2019). Исходя из этих ограничений, поток H₂O, поступающий в группу кальдер, оценивается как 0,4–2,2 × 10⁵ кг/год, или 2–11 т/год/м на единицу вдоль протяженности дуги. Эти результаты позволяют предположить, что большая часть H₂O, высвобождаемой из субдуговой магмы (4 мас. % H₂O; ~13 т/г/м; Kimura and Nakajima, 2014), не реагирует с окружающей корой, а транспортируется вверх к магматическим камерам в верхней коре, насыщается на уровне ~8 км (расплав 5–6 мас. % H₂O) и высвобождает H₂O со скоростью 2–11 т/г/м.

Ключевые слова: баланс воды, кора в зоне дуги, реликтовая кальдера, зона реакция, расплавленное включение, сверхкритический геотермальный резервуар

1. Introduction

Subduction zones are characterized by the supply of fluids from the subducting slab to the subarc mantle, generation of hydrous melt at subarc, which subsequently ascend to the arc crust. Such hydrous melt is the main forms of H₂O supply to the arc (Kimura and Nakajima, 2014), and is important for the formation, energy potential and sustainability of supercritical geothermal reservoirs (Scott et al., 2015; Tsuchiya et al., 2016; Amanda et al., 2019). However, up to now, there has not been a comprehensive model on the H₂O budget of the entire arc crust, that describes the amount of generation, supply and consumption of H₂O within arc crust.

To constrain the H₂O budget within arc crust, this study focused on (1) the crust–melt/fluid reaction zones in lower crustal conditions and (2) H₂O supply in the upper crustal magma chambers. Based on the mineralogical and geochemical analyses of the crust–melt/fluid reaction zones, Sør Rondane Mountains, East Antarctica (Uno et al., 2017), we have constrained the H₂O flux during the lower crustal magma ascent. The petrological analyses of fossil magma chambers at NE Japan (Suzuki et al., 2017; Amanda et al., 2019), enable us to quantify the Myr-scale H₂O input to the upper crustal magma chambers. These results are combined to construct 0th-order model of the H₂O budget within the arc crust.

2. Water supply to subarc

Several models of H₂O budgets along subducting slab suggest that the water input at trench ranges 23–72 t/yr for a 1 m width of slab (t/yr/m; e.g., van Keken et al., 2011; Kimura and Nakajima, 2014). Out of these input at trench, ~5–50 t/yr/m are transported to arc crust in the forms of hydrous melt (~13 t/yr/m at NE Japan; Kimura and Nakajima, 2014). The H₂O contents of hydrous basaltic melt at subarc is universally similar, and is ~4 wt% (Plank et al., 2013; Kimura and Nakajima, 2014; Fig. 1). Based on the width (~50 km) and spacing (~100 km) of the hot fingers, the subarc magma may concentrate into the hot fingers by the factor of ~2, resulting in supply of 10–100 t/yr/m H₂O in lower crustal hot fingers.

3. H₂O budget at crust–melt/fluid reaction zones

3.1 H₂O budget constrained from crust–melt/fluid reaction zones

The consumption of H₂O during the magma ascent at lower-middle crust is constrained from the granulite-hosted crust-melt/fluid reaction zones at Sør Rondane Mountains, East Antarctica (Fig. 1; Uno et al., 2017). Granitic dike boundaries with pargasite–phlogopite peridotite exhibit hydration reaction zones that formed by the release of H₂O from the granitic dikes at ~0.5 GPa, 700 °C (Uno et al., 2017). Based on the increase of H₂O content in the reaction zones compared to the host pargasite–phlogopite peridotite, the H₂O supply from the granitic melt to the crust is quantified as 4.2 kg per 1 m² of dike wall (Fig. 1d).

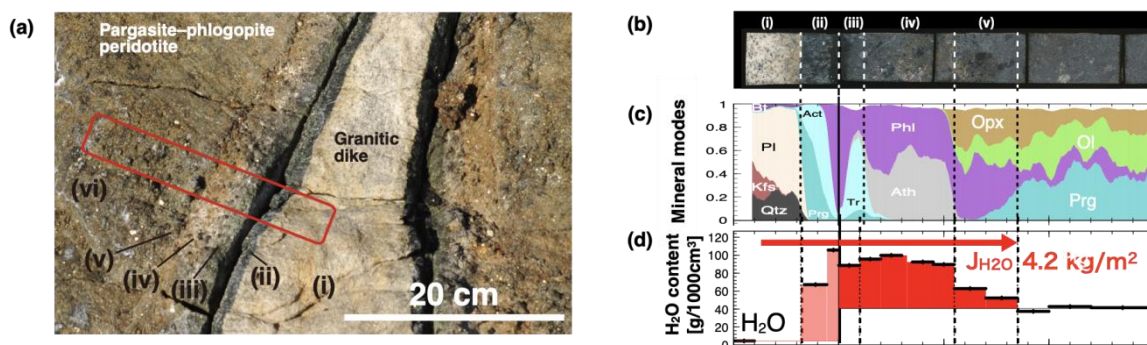


Figure 1 – Crust–melt/fluid reaction zones at Sør Rondane mountains, East Antarctica. (a) Outcrop photograph, (b) Cross section of the rock samples, (c) Mineral modes, (d) H₂O contents

3.2 H₂O budget during magma ascent in the lower crust

Based on the observation above, H₂O consumption during the ascent of granitic magma in the lower crust can be modelled as follows:

$$X_{\text{hydration}} \frac{\text{H}_2\text{O consumed by the hydration of crust [kg]}}{\text{H}_2\text{O in original magma [kg]}} = \frac{2 J_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{hydration}}}{C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{magma}} R_{\text{magma/dike}} W_{\text{dike}}} \quad (1)$$

where $X_{\text{hydration}}$ represent the ratio of mass of H_2O consumed by the hydration over the mass of H_2O contained in the original magma. $J_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{hydration}}$, $C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{magma}}$ are total flux of H_2O during hydration of crust per unit surface of dike wall [kg/m^2], H_2O content in original magma [kg/m^3], respectively. W_{dike} is width [m] of dike. $R_{\text{magma/dike}}$ represents the volume ratio of total amount of magma over the volume of dike, or «magma/dike volume ratio».

Based on $J_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{hydration}}$ of $\sim 4.2 \text{ kg}/\text{m}^2$ (Fig. 1) and the H_2O contents of granitic melt $\sim 5.0\text{--}5.6 \text{ wt}\%$ (Uno et al., 2017), $X_{\text{hydration}}$, the ratio of H_2O consumption by hydration over H_2O transport by magma, can be expressed as a function of dike width (W_{dike}) and magma/dike volume ratio ($R_{\text{magma/dike}}$) (Fig. 3). Considering the ranges of typical dike width at crustal rocks $0.1\text{--}100 \text{ m}$, and geometrical constraints of $R_{\text{magma/dike}} > 1$, the range of $X_{\text{hydration}}$ is constrained as $< 35 \%$, is and $\ll 10 \%$ for most cases. This suggest that H_2O consumption during magma ascent at lower crustal condition is minor, and most of the H_2O contained in the hydrous melt is effectively transported towards the upper crust.

4. H_2O supply at upper-crustal magma chambers

4.1 Depth and H_2O contents of magma chambers under fossil calderas, NE Japan

The amount of H_2O supplied to upper crust is constrained from the mass balance of fossil magma chambers distributed in NE Japan arc. The Miocene Shirasawa and Fukano Calderas are in one of fossil caldera clusters in NE Japan, located $\sim 20 \text{ km}$ east from the present volcanic front (Fig. 2a).

The SiO_2 content of the melt inclusions are $70\text{--}78 \text{ wt}\%$ for most of the inclusions, and mostly classified as rhyolite or dacite. The estimated entrapment pressures of melt inclusion based on melt-quartz-feldspar equilibria (Blundy and Cashman, 2001; Wilke et al., 2017) concentrate at around $30\text{--}320 \text{ MPa}$ for both Shirasawa and Fukano calderas, suggesting that the magma chamber had existed at $0\text{--}12 \text{ km}$ depth during the activities of these fossil magma chambers (Fig. 2b).

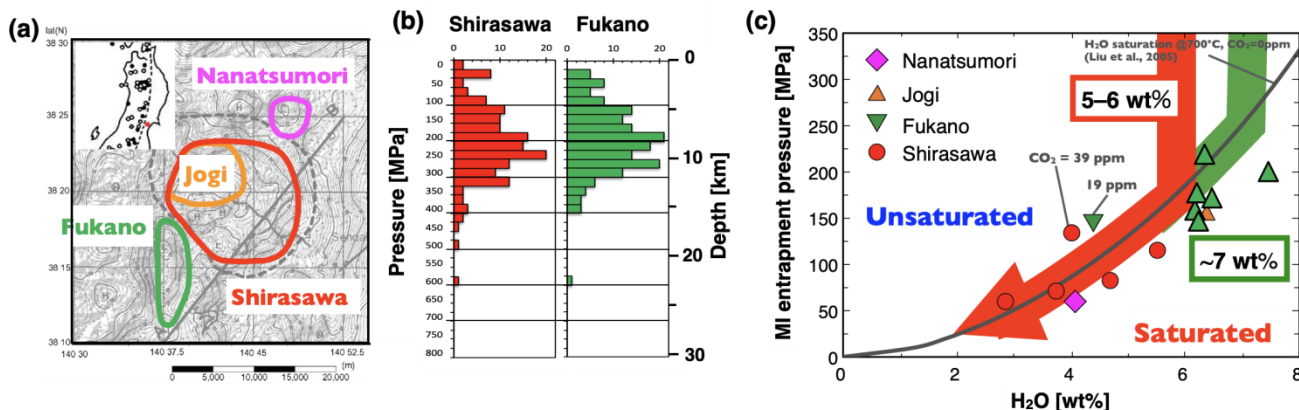


Figure 2 – Fossil caldera cluster at NE Japan and pressures recorded in melt inclusions. (a) Locations of the Shirasawa and Fukano calderas (modified after Komazawa and Mishina, 2002), (b) Frequency of the entrapment pressures of melt inclusions in quartz phenocrysts, (c) Relations of H_2O contents and entrapment pressures of melt inclusions estimated from quartz–plagioclase–melt equilibria

The H_2O contents of the melt inclusions ranges $2.8\text{--}5.5 \text{ wt}\%$ ($n = 4$), $6.4 \text{ wt}\%$ ($n = 1$), and $3.3\text{--}7.4 \text{ wt}\%$ ($n = 8$) for Shirasawa, Jogi and Fukano calderas, respectively. The pressure– H_2O content relations are consistent with the H_2O saturation curve (Liu et al., 2005) assuming $\sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$. These relations suggest that the melt of the Shirasawa and Fukano calderas are saturated with H_2O at pressures $< 150\text{--}200 \text{ MPa}$ ($< 8 \text{ km}$). Maximum H_2O contents of the melt were $5\text{--}6 \text{ wt}\%$ and $\sim 7 \text{ wt}\%$ for Shirawa and Fukano calderas, respectively (Fig. 2c).

4.2 H_2O flux into fossil calderas and caldera clusters

Based on depth range of magma chamber of $7\text{--}10 \text{ km}$ (Fig. 2b), primary H_2O contents in rhyolite melt of $5\text{--}6 \text{ wt}\%$ (Fig. 2c), as well as the caldera diameter ($15\text{--}20 \text{ km}$; Komazawa and

Mishina, 2002) and caldera duration of 2–3 Myr (K-Ar and zircon U-Pb dating; Fujiwara et al., 2014), the H₂O flux towards the magma chamber of Shirasawa caldera was constrained as $0.5\text{--}2.2 \times 10^5$ t/yr, corresponding to 3.1–10.8 t/yr/m arc length. Estimates for Fukano caldera is also consistent (2.3–7.6 t/yr/m), resulting H₂O flux to the calderas in the order of 2–11 t/yr/m.

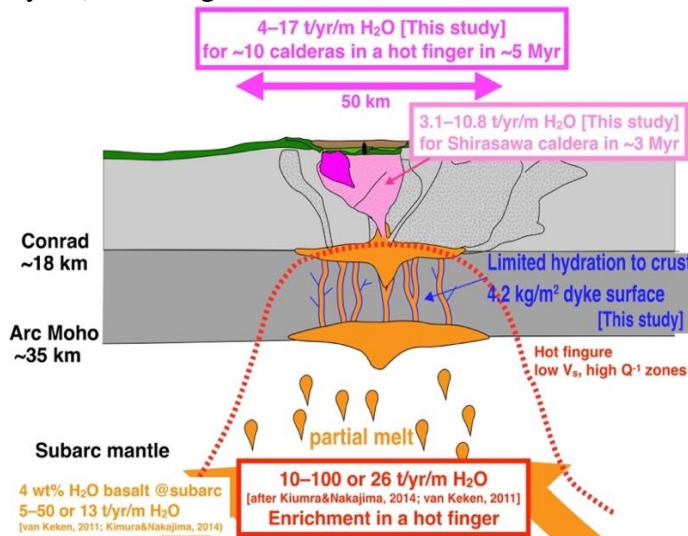


Figure 3 – Summary of the water budget in arc crust constrained by this study and previous studies

5. Summary and conclusions

As an attempt to constrain the deep sources of supercritical geothermal reservoir, 0th-order model of water budget in arc crust was constructed through the mass balance analyses of crust–melt/fluid reaction zones and upper crustal magma chambers (Fig. 3). At the base of arc crust, H₂O is supplied in the forms of hydrous basaltic melt with ~4wt% H₂O and a flux of 5–50 or ~13 t/yr/m. These fluxes are expected to concentrate by a factor of ~2 under the hot finger areas (10–100 or ~26 t/yr/m). Mass balance analyses of crust–melt/fluid reaction zones show that the hydration of the crust is limited at a total flux of ~4.2 kg H₂O/m² dike surface. As a results, > 65 % (> 90 % for most cases) of H₂O in the subarc magma is expected to be transported to the upper crust. The Myr-scale H₂O flux from the hydrous magma observed at fossil caldera magma chambers is ~2 – 11 t/yr/m, and those for a caldera cluster is estimated as 4–17 t/yr/m. The results of this study suggest that subarc flux and upper crustal flux of H₂O are largely consistent by a factor of ~2, and the subarc H₂O are effectively transported to upper crust in the form of hydrous magma. Further understanding on the magma differentiation, and crustal lithology, water content, fracture density and permeability are needed for better estimation, as well as the role of non-volcanic H₂O fluids on the budget of H₂O in arc crust.

The reported study was funded by RFR and JSPS according to the research project 21–55–50003 «Magma fracking and Fluid Flows in Volcanic Structures»

References

1. Amanda F. F., Yamada R., Uno M., Okumura S. and Tsuchiya N. (2019) *Geofluids* 2019, 3031586.
2. Blundy J. D. and Cashman K. (2001) *Contrib. to Mineral. Petrol.* 140, 631–650.
3. van Keken P. E., Hacker B. R., Syracuse E. M. and Abers G. A. (2011) *J. Geophys. Res.* 116.
4. Kimura J.-I. and Nakajima J. (2014) *Geochim. Cosmochim. Acta* 143, 165–188.
5. Komazawa M. and Mishina M. (2002) *Earth, Planets Sp.* 54, 1049–1053.
6. Plank T., Kelley K. a., Zimmer M. M., et al. (2013) *Earth Planet. Sci. Lett.* 364, 168–179.
7. Scott S., Driesner T. and Weis P. (2015) *Nat. Commun.* 6, 7837.
8. Tsuchiya N., Yamada R. and Uno M. (2016) *Geothermics* 63, 182–194.
9. Uno M., Okamoto A. and Tsuchiya N. (2017) *Lithos* 284–285, 625–641.
10. Wilke S., Holtz F., Neave D. A. and Almeev R. (2017) *J. Petrol.* 58, 789–818.

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

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

УДК 551.49 + 553.23

Modern hydrothermal Systems and Fluid Degassing of the Kyrgyz Tien Shan

Dzumagul Kendirbaeva

*Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic
jmaevna48@gmail.com*

Endogenous fluids, crossing all layers of the earth's crust and rearranging the initial chemical composition, reach the earth's surface in the form of TMV with a stable development mode (compression-extension). This is evidenced by their high temperature (≥ 40 °C), helium content from 2.6×10^{-4} to 1.1×10^{-3} ml/l, which exceeds the atmospheric background, as well as radioactivity ($^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn} + 4\text{He}$) up to 25 nCi/L and the content of deuterium (D ‰), not typical for infiltration waters.

Keywords: thermal waters, helium and deuterium, mosaicity and episodicity, factor analysis, fluid degassing

Современные гидротермальные системы и флюидная дегазация Кыргызского Тянь-Шаня

Дж.Ж. Кендирбаева

Институт сейсмологии Национальной Академии наук Кыргызской Республики

Эндогенные флюиды, пересекая все слои земной коры и перестроив первоначальный химический состав, достигают по глубинным нарушениям с устойчивым режимом развития (сжатие-растяжение) поверхности земли в виде ТМВ. Об этом свидетельствуют их высокая температура (≥ 40 °C), гелиеносность от $2,6 \times 10^{-4}$ до $1,1 \times 10^{-3}$ мл/л, превышающая атмосферный фон, а также радиоактивность ($^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}+4\text{He}$) до 25 нСи/л и содержание дейтерия (δД ‰), не свойственные инфильтрационным водам.

Ключевые слова: термальные воды, гелий и дейтерий, мозаичность и эпизодичность, факторный анализ, глубинные разломы, флюидная дегазация

Введение

Одним из перспективных регионов для изучения эндогенной дегазации в современных гидротермальных системах, связанных с глубинными зонами земной коры, является Кыргызский Тянь-Шань. Его активность обусловлена поднятием мантии и внедрением в земную кору «плюма», а также наличием вдоль разломов гидротермальных линий с куполообразными формами.

На территории Кыргызстана проведены многочисленные профильные и площадные геолого-гидрогеологические работы, т.е. пробурены скважины до глубины 5–6 км с поинтервальным гидрохимическим опробованием. По этим данным состав газов, в т. ч. гелия и углекислого газа в них показал достаточную устойчивость. Как показано в (Иманкулов и др., 2006), они указывает на наличие в глубинных нарушениях с высокими геотермическими полями избирательной циркуляции газо-водяного флюида. К этому наталкивает представление о том, что в консолидированной коре реально не существует даже незначительных объемов пространства без трещиноватости и, как следствие, без жидкого или газообразного флюида.

Материалы и методика исследований

Для достижения цели использованы многочисленные публикации по геологии, тектонике и сейсмичности областей с аналогичной историей геологического развития, а также результаты геохимического опробования скважин, пробуренных на нефть, газ и ТМВ, а также собственные разработки лабораторно-экспериментальных работ. При этом источники их питания изучены по содержаниям дейтерия (δD) и δO^{18} , а для объективной их интерпретации в объекты включены реки и озера, а также воды неглубоких горизонтов в четвертичных отложениях.

Наличие современной дегазации рассмотрены на основе газо-водяных выделений, которые, пересекая все слои земной коры и перестроив первоначальный состав, достигают поверхности земли. Это высокая температура (≥ 40 °C), концентрации гелия от $2,6 \times 10^{-4}$ до $1,110^{-3}$ мл/л, превышающие атмосферный фон на порядок ($3-5 \times 10^{-5}$), а также радона ($^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn} + 4\text{He}$) до 25 нСи/л и дейтерия (δD ‰), не свойственного инфильтрационным водам. Об этом свидетельствуют данные (Иманкулов, 2017), т. е. наибольшие концентрации гелия и дейтерия обнаружены в источниках Алтын-Арашан и в скважинах Аксу (Теплоключенка) в восточной части Тескейского массива, тогда как таковые в аналогичных условиях Киргизского хребта (Аламедин, Иссык-Ата), как и на площади Бар-Булак Иссык-Кульского бассейна, составляет первые сотни долей мг/л.

Для полноты сведений об общности генезиса терм у водопунктов определялись свободный и растворенный H_2S , O_2 и CO_2 , Br^- и I^- , а также летучие макрокомпоненты, тогда как в лаборатории – концентрации гелия (He) и аргона (Ar), значения pH и Eh.

Анализ и интерпретация показателей ТМВ основаны на статистических приемах обработки с совмещением факторного анализа. С помощью первого выясняются теснота и формы связи между параметрами, а второй из множества признаков обеспечивает оптимальное выделение главного фактора. Так, данные анализируются на основе, так называемых, варимаксных факторов, сглаживающих закономерные циклы, например, метеорологические условия и инфильтрационный источник, усиливают флюидные глубины как процесса, вносящего существенный вклад в содержащиеся компоненты и их набор.

Полученные результаты и их обсуждение

В основу анализа и интерпретации полученных результатов заложена теория о пульсирующем дыхании Земли, согласно которой мозаичность геохимического облика и эпизодичность выходов, по мнению (Кендирбаева, 2018), привязанные к определенным геологическим периодам, связаны с различием в интенсивности неотектонических движений и сложностью морфологии разрывно-блоковых структур, по которым циркулируют ТМВ. К ним относятся прямая, обратная и пульсирующая зональности, где в периоды до, во время и после реализации землетрясений проявляются по-разному кратковременные и скачкообразные всплески.

Поскольку, по (Кендирбаева, 2018) углекислый газ является одним из ведущих участников в современной дегазации Земли. Этим самым показано существование закономерных взаимосвязей между долго- короткопериодными вариациями CO_2 и тектонической активностью земной коры, причем их качественный и количественный набор дифференцирован от древних зон к сейсмоактивным районам – в первом случае встречается «тройной» состав из водорода, гелия и радона, а в молодых за счет CO_2 , H_2S и Ar достигают до 5–6. Рассмотрены пути миграции газов, жидкости и пластичного продукта, образующие многофазные флюидные системы с неотектоническим смещением от 10 до 12 км и высокими значениями P-T условий (Кендирбаева, 2019). Действительно, независимо от видов водопунктов (источники, скважины) и стратиграфо-литологических разностей вмещающих образований, а также от глубины циркуляции зафиксировано разнообразный уровень параметров ТМВ. Это наибольшая аккумуляция концентрации газов и дейтерия, экзотичных для верхней части разреза, которые, благодаря активности окисляющей способности процессов синтеза, приводящих образованию в мигрирующем флюиде новых ионов и их ассоциаций, устойчивых при текущих P-T условиях (Рис. 1).

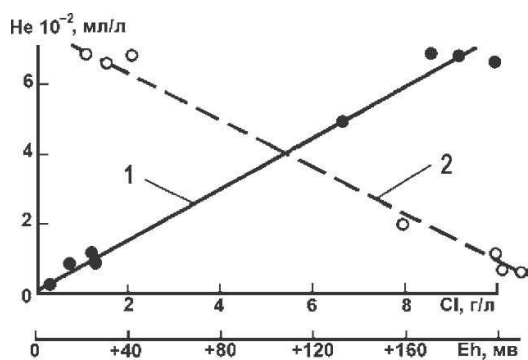


Рисунок 1 – Содержание в водах хлора (1) и Eh (2) в зависимости от количества гелия

Итак, основное количество гидротермальных систем региона формируются на глубинах 4–5 км инфильтрационными водами, нагретыми за счет высоких соотношений Р-Т условий, но эпизодически в них участвуют флюидальные растворы. Например, миграции растворителя-Н₂О и растворенного вещества в зависимости от структурно-тектонического строения структур носят сложный характер: генетически разные системы обязаны внедряющимся эндогенного флюида и спускающимся атмосферных вод, в движениях которых возникают четыре различных типа траекторий (Кендирбаева, 2020).

В их скоплениях следствием такого сложного взаимодействия являются грибообразные формы и устойчивый состав дейтерия, обусловленные наличием дефектов-«жгутиков» в блоках с разными физическими свойствами. Это проявляется при условии, если в структурах-разломах в течение длительного геологического времени не сменяются характер и знаки тектонического развития («сжатие-растяжение») (Кендирбаева, 2019).

Выводы

Пространственно-временные закономерности скопления экзотичных компонентов в различных типах термальных вод при решении фундаментальных задач гидрогеологии представляют большой научно-практический интерес. Дело в том, что их основные типы находятся в 3-х неотектонических зонах: первый- регионы с современным горообразованием (Тянь-Шань, Прибайкалье, Алтай и Бурято-Охотск), второй- области, находящиеся на завершающей стадии альпийской складчатости (Кавказ, Копет-Даг и Памир) и третий- районы современного вулканизма (Камчатка). В термах Кыргызского Тянь-Шаня на этом фоне улавливаются признаки флюидности земной коры, которые указывают на процессы геотермальной деятельности, продолжающиеся в настоящее время. Их общими чертами являются приуроченность к глубинным разломам, испытавшим в неотектонический этап усилия «растяжения» и, как следствие, преобладание гелия и дейтерия, аргона и натрия, сульфатов и хлора (Кендирбаева, 2017).

Таким образом, как показывают качественные состояния и количественные содержания параметров изученных термальных вод, в них избирательно участвуют газ-водяные флюиды, перестроив изначальный состав и за счет проникновения атмосферных вод на глубины, обеспечивающие на устье скважин нагрев от 50 до 60 °С, формируя грибообразные купола «растекания».

Список литературы

1. *Imankulov B.I.* Fault hydrogeological system of the Kyrgyz Tien Shan as a reflection of the influence of endogenous and exogenous factors / *B.I. Imankulov, J. Zh. Kendirbaeva, N.T. Kozhakova* // Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (geology and technical sciences). Almaty, 2006. № 2. pp. 43–45.
2. *Imankulov B.I.* On the study of groundwater in intermontane depressions of the Kyrgyz Tien Shan in the light of the general theory of systems / *B.I. Imankulov, J. Zh. Kendirbaeva* // Proceedings of Int. conf. Ural State University «9th readings in memory of Yu.P. Bulashevich». Ekaterinburg, 2017. pp. 197–200.
3. *Kendirbaeva J. Zh.* About the geochemistry of thermomineral waters and endogenous fluids of the Kyrgyz Tien Shan / *J. Zh. Kendirbaeva* // Materials Int. conf. Probl. geodyne. and geocol. inland. orogens. Bishkek, 2018. pp. 153–158.
4. *Kendirbaeva J. Zh.* New data on the features of the gas-chemical composition and temperature of thermal waters of the Kyrgyz Tien Shan (on the example of the thermal waters of Jety-Oguz) /

J. Zh. Kendirbaeva // Sat. All-Russian meeting «Geothermal volcanology, hydrogeology, oil and gas geology». Institute of Volcanology and Seismology. FEB RAS. 2020. pp. 74–79.

5. *Kendirbaeva J. Zh. Spatio-temporal interaction in the system «seismicity-thermal waters-solar heterogeneity» on the territory of Kyrgyzstan / J. Zh. Kendirbaeva // Vestnik KRAUNC. Physical and mathematical sciences. 2019. V. 29, № 4. pp. 110–124.*

6. *Kendirbaeva J. Zh. Typification of the spatio-temporal morphology of hydrogeochemical and hydrodynamic trajectories of Kyrgyzstan during seismic activation / J. Zh. Kendirbaeva // Sat. All-Russian Conf. with international participation Shchukin readings. 2020. pp. 160–167.*

7. *Kendirbaeva J. Zh. Results and prospects of seismic-hydrogeological monitoring in the territory of Northern Kyrgyzstan / J. Zh. Kendirbaeva, V.V. Grebennikova // Coll. Int. Conf «Problems of geodynamics and geocology of inland orogens». Bishkek, 2017. pp. 184–189.*

УДК 550.343+551.24

Two-stroke geofluidic model of the strongest Pacific earthquakes foci development on the example of the Tohoku earthquake (March 11, 2011, $M = 9,1$)

Alexey Solomatin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
alf55@mail.ru*

The article proposes a geofluidodynamic model of the strongest ($M \geq 7,7$) earthquakes foci development in subduction zones. The basis of this model is the concept of a complex, two-stroke nature of the seismicity response to a periodic external of stress waves in the future foci of such earthquakes. An important part of this model is the assumption that the seismic environment is saturated with fluids. To date, there is no clear understanding of any of the constituents of the seismic-active medium model in its evolution critical phase: neither in terms of the external forces of a global nature on it, nor in terms of its response on these forces, not in terms of participating in this response of highly mobile fluids. In the study, this complex problem is solved at the conceptual level. The practical implementation of this solution is shown by the example of the March 11, 2011 catastrophic Tohoku earthquake focus development. In general, the results are important both for the development of methods for long-term earthquake hazard assessments and for their medium to short-term refinements, in line with the general concept for the development of long-term seismic forecasting (LTSF) method by S.A. Fedotov.

Keywords: seismic process, earthquake source, geofluidodynamics, geomechanical model of seismicity

Двухтактная геофлюидодинамическая модель развития очагов сильнейших Тихоокеанских землетрясений на примере землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г., $M = 9,1$

А.В. Соломатин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

В работе предложена геофлюидодинамическая модель развития очагов сильнейших ($M \geq 7,7$) землетрясений в зонах субдукции. Основой этой модели является представление о сложном, двухтактном характере отклика сейсмичности в готовящихся очагах таких землетрясений, находящихся на заключительной стадии развития, на периодическое внешнее воздействие в виде волн напряжения. Важной частью этой модели является учет насыщения сейсмоактивной среды флюидами. К настоящему времени нет четких представлений ни об одной из составляющих подобной модели сейсмоактивной среды в ее критической фазе развития: ни в плане внешнего силового

воздействия глобального характера на нее, ни в плане ее отклика, проявляющегося в наиболее общем виде, ни в плане участия в этом отклике высокоподвижных флюидов. В исследовании эта комплексная задача решена на концептуальном уровне, а практическая реализация этого решения показана на примере развития очага катастрофического землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г., $M = 9,1$. В целом полученные результаты имеют важное значение как для развития методов долгосрочных оценок опасности сильнейших землетрясений, так и для ее среднесрочно-краткосрочных уточнений – в полном соответствии с общей концепцией развития метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) С.А. Федотова.

Ключевые слова: сейсмический процесс, очаг землетрясения, геофлюидодинамика, геомеханическая модель сейсмичности

Введение

Землетрясение Тохоку 11. III 2011 г. с $M = 9,1$ было сильнейшим землетрясением мира после гигантского Суматра-Андаманского землетрясения 26. XII 2004 г., $M = 9,1$. Сеймотектонические условия в районе его очага являются аналогичными условиям соседней протяженной структуры – Курило-Камчатской дуги, для которой более полувека лет назад С.А. Федотовым был предложен метод долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП), до настоящего времени являющийся как эффективным методом прогноза сейсмической опасности, так и основой развития ее среднесрочных и краткосрочных уточнений (Fedotov et al, 2010; Solomatin, 2014, 2021; и мн. др). Таким образом, изучение особенностей этого землетрясения, является важным для дальнейшего развития метода ДССП, уточнения и повышения сейсмических прогнозов на его основе, прежде всего, – для Курило-Камчатской дуги и подобных сеймотектонических структур.

Землетрясение Тохоку 11. III 2011 г. произошло в Японском желобе, где кора Тихого океана погружается под Охотскую плиту. Анализ особенностей развития сейсмического процесса в очаге землетрясения Тохоку показал, что форшоковое повышение сейсмической активности в его очаге с $M_{max} = 7,3$ началось 9 марта 2011 г. в полном соответствии со «сценарием форшоков» (Fedotov et al., 2012). Эта активизация происходила вблизи эпицентра главного события. В то же время, при расширении указанного сценария на более ранний период было отмечено, что все сильнейшие землетрясения Курило-Камчатского региона, как правило, предварялись значимой активизацией в период $T = 1043 \pm 10$ суток (2,86 лет) до главного события. В очаге землетрясения Тохоку такая активизация с главным событием $M_{max} = 6,9$ наблюдалась за 1038 суток – 7. V 2008 г. и располагалась вблизи его главного афтершока с $M = 7,9$. Подобные активизации, связанные с периодичностью развития сейсмического процесса (Solomatin, 2014), были отмечены и в других сейсмоактивных областях Тихого океана.

В дополнение к параметрам, определяющим уровень активности сейсмического процесса (Fedotov et al, 2010), при изучении развития очагов сильнейших землетрясений важно, как показано в (Solomatin, 2021), важную роль играет изучение его энергетического спектра, отражающего распределение землетрясений по энергетическим диапазонам. В простейшем виде этот спектр представляется линейным соотношением в законе Гутенберга-Рихтера, но в то же время, закономерно сложнее его. В указанной работе были отмечены периодические вариации наклона графика повторяемости преимущественно в диапазоне наиболее слабых из них, указывающие на изменения этого спектра на заключительной стадии подготовки сильнейших землетрясений Тихого океана и Юго-Восточной Азии – в целом и для Курило-Камчатского региона со смежными областями – в частности (Рис. 1).

В контексте настоящего исследования дополнительно считается, что эти вариации отражают напряженное состояние и флюидонасыщенность сейсмоактивной среды (Кирюхин, 2020). Предполагается, что высокий наклон графика повторяемости землетрясений в исследуемом участке сейсмоактивной зоны, по сути указывающий на ограничение возможности генерации относительно сильных событий, связан с высоким напряжением в областях потенциальных разрывов и отсутствием компенсирующего это

напряжения давления флюидов. Хотя представление об общем напряжении без разделения его на нормальное и тангенциальное по

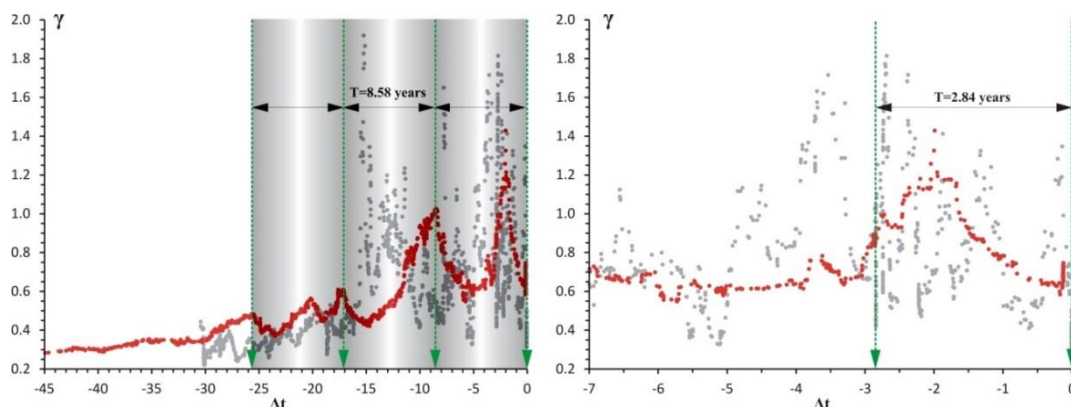


Рисунок 1 – Ход наклона графика повторяемости землетрясений в очаге сильнейшего землетрясения до момента основного события (данные NEIC в пересчете на энергетический класс К (Solomatin, 2021)). Красные точки – обобщенные данные для Курило-Камчатского региона и смежных областей Тихоокеанской сейсмоактивной зоны (Solomatin, 2021). Серые точки – аналогичные данные для области очага землетрясения Тохоку 11.III 2011 г. Градиентом указаны предполагаемые вариации напряжения геосреды с периодом 8,58 лет (Solomatin, 2014). Справа – детализация общего рисунка в диапазоне последних 7 лет

отношению к преобладающему направлению плоскостей разломов в контексте разломообразования является грубым приближением, тем не менее, здесь оно по-видимому вполне допустимо в качестве первого приближения.

Данные по временным вариациям наклона графика повторяемости (Рис. 1) достаточно однозначно указывают на периодичность этого процесса, проявляющегося наиболее четко в 15-летний период III, заключительной стадии цикла развития очагов сильнейших землетрясений (Fedotov et al, 2010).

С другой стороны, низкий наклон графика повторяемости указывает на повышенную вероятность относительно сильных землетрясений – повышение их веса в энергетическом спектре.

На развитие очага землетрясения Тохоку сильное влияние оказало предыдущее сильнейшее ($M = 7,8$) землетрясение региона, произошедшее 28.XII 1994 г. – за 16,2 года до него (Рис. 2).

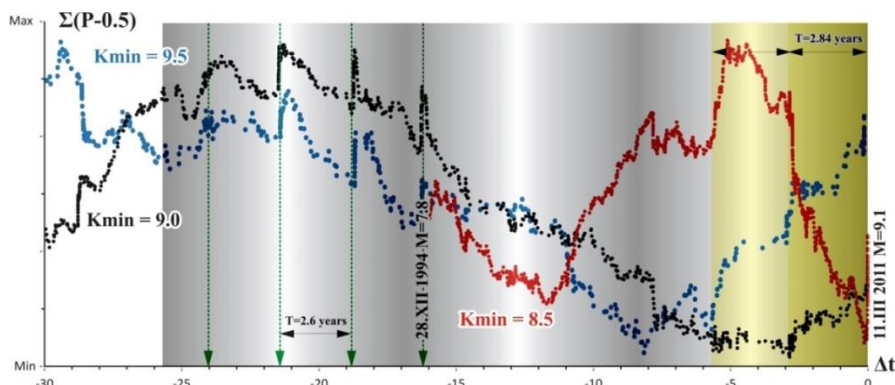


Рисунок 2 – Кумулятивные кривые активности в различных энергетических диапазонах сейсмического процесса. Градиентом указаны вариации напряжения геосреды с периодом 8,58 лет (Solomatin, 2014)

После подвижки в результате этого землетрясения, произошедшего на северной границе исследуемой области и имевшего обычный для всего рассматриваемого участка поддвиговый механизм (данные NEIC), на концептуальном уровне можно ожидать рост напряжений в остальной ее части. Этот рост (длительностью порядка одного года – основной период развития афтершокового процесса в очагах сильнейших землетрясений) наложился на относительный спад в соответствии с периодичностью 8,58 лет (Рис. 2). В целом в период времени 16 – 12 лет до момента землетрясения Тохоку для исследуемого участка наблюдается высокий наклон графика повторяемости (0,56 при нормальной его величине 0,5 (Solomatin, 2021)), который вполне соответствует нисходящим участкам всех трех графиков этого периода.

Отдельно необходимо отметить ряд активизаций с периодом около 2,6 года перед землетрясением 28.XII 1994 г. на фоне нормального и повышенного наклона графика повторяемости (горизонтальный и падающий ход кумулятивных кривых). По-видимому, именно таким образом должно проявляться воздействие периодического притока флюидов в локальных участках – областях активизаций.

В интервале с 11 лет до 8,5 лет до землетрясения Тохоку в исследуемой области на фоне очередного роста напряжения в геосреде начинается стягивание мелких разломов в более крупные и соответствующее перераспределение напряжений, а за 4–5 лет и почти до главного события на фоне очередного роста напряжений отмечаются проявления дилатансии – возникновения множества дислокаций отрывного характера, что проявляется в увеличении числа наиболее слабых землетрясений, проявляющемся в отрицательном наклоне кумулятивной кривой для вероятностной оценки уровня активизации P для диапазона землетрясений с $K_{min} = 8,5$ на Рис. 2. Существенно при этом отметить разный для этих двух случаев наклон хода кривой для относительно сильных ($K \geq 9,5$) землетрясений: положительный наклон этой кривой непосредственно перед землетрясением указывает на значительно возросшую вероятность появления в этот период самых сильных землетрясений – форшоков.

Завершается процесс, по-видимому, притоком флюидов в область вблизи будущего эпицентра, сопровождаемый форшоковой активизацией за двое суток до главного события. На это указывает факт, что эта активизация характеризуется низким наклоном графика повторяемости во всем энергетическом диапазоне сейсмичности (рост всех трех кривых), а также, как и выше, – краткосрочность этого процесса и его периодичность: как и отмеченные выше краткосрочные периодические вариации кривых на Рис. 2 перед землетрясением 28.XII 1994 г., аналогичные вариации отмечаются дополнительно за 5,57 и 2,84 года до землетрясения Тохоку (период $T = 2,72$ – $2,84$ года вместо отмеченного ранее периода $T = 2,6$ года). В этот период в исследуемой области произошли следующие активизации: 16.VIII 2005 г. ($M_{max} = 7,2$ вблизи эпицентра основного события) и 7.V 2008 г. ($M_{max} = 6,9$ вблизи эпицентра его главного афтершока $M = 7,9$).

Заключение. Выводы

Предложенная геофлюидодинамическая модель развития очагов сильнейших землетрясений зон субдукции основана как на общих представлениях о закономерных вариациях повторяемости сейсмических событий в области будущих очагов таких землетрясений, так и на представлении этих вариаций в случае подготовки землетрясения Тохоку. Существенным фактором построения этой модели является представление о квазипериодичности сейсмического процесса. Самым важным допущением является предложенная в исследовании связь наклона графика повторяемости землетрясений некоторой области с гипотетическими вариациями динамического напряжения в ней, а также с флюидонасыщенностью сейсмоактивной среды в этой области.

В целом, с учетом всех сделанных допущений, предложенная модель является концептуальной. Несмотря на то, что отдельные элементы предложенной модели могут быть основой среднесрочно-краткосрочных прогнозов, в дальнейшем в целях ее использования в предложенном комплексном виде, введенные предположения необходимо проверить как на основе материала других подобных землетрясений, так и, возможно, на основе наблюдений отличных от сейсмологических: геофизических, геодезических, гидрогеохимических и др., а также на основе моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ_а «Магматический фрактинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА–А20–120121090010–7.

Список литературы

1. *Fedotov S.A.* A Long-Term Earthquake Forecast for the Kuril-Kamchatka Arc for the Period from September 2010 to August 2015 and the Reliability of Previous Forecasts, as Well as Their Applications / *S.A. Fedotov, A.V. Solomatin, S.D. Chernyshev* // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2010. V. 5, № 2. pp. 75–99.
2. *Solomatin A.V.* A Study of the Relationship Between Volcanic Activity and Great Earthquakes: the Kuril-Kamchatka Region / *A.V. Solomatin* // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2014. V. 8, № 1. pp. 54–68.
3. *Solomatin A.V.* The Energy Spectrum of the Seismic Process in Application to Long-Term Earthquake Prediction and Intermediate- and Short-Term Updating of Earthquake Hazard. / *A.V. Solomatin* // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2021. V. 15, № 2. pp. 133–144.
4. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

УДК 551.253

Fluid-driven crustal fracturing mechanism in the middle-lower crust preserved in metamorphic reaction zones

Mindaleva Diana, Masaoki Uno, Noriyoshi Tsuchiya

*Tohoku University, Graduate School of Environmental Studies, Sendai, Japan,
diana@geo.kankyo.tohoku.ac.jp*

Fluid flow in the Earth Crust cause hydration reactions, which induce mass and heat transport, and changes hydrological properties of rocks. Fluid pressure rise cause permeability increase and rock fracturing. Newly formed fractures provide pathways for the fluid infiltration. Such fluid activity could be related to earthquakes generation (e.g., Katsumata and Kamaya, 2003; Obara et al., 2004). However, quantitative constraints on fluid fluxes and crustal permeability are limited, particularly with regards to its temporal and spatial heterogeneity. Therefore, it is important to constrain amount of fluid fluxes to understand roles of fluids in seismic events, permeability evolution and water-rock interaction in the crust.

Here, we focus on fluid flow through a single fracture and scales these results to a series of low-magnitude fracturing events, such as tremors, to provide new insights into fracturing and fluid–rock interactions in the lower–middle crust. Specifically, we analyse unique geological and geochemical evidence preserved in fluid–rock reaction zones to estimate the duration of fluid infiltration and time-integrated fluid fluxes, and then estimate the generated seismic moment and magnitude due to this fluid flow. This study is based on evidence of rapid fluid infiltration (~10 h) and permeability evolution from low-permeable to highly-permeable rocks ($\sim 10^{-9}$ – 10^{-8} m²) related to crustal fracturing at depths around 10–20 km (Mindaleva et al., 2020). We estimate the time-integrated fluid fluxes both through and perpendicular to a given fracture and the overall fluid–rock reaction zone. We present a new methodology for estimating the fluid volume required to induce fluid-driven seismic activity via coupled reactive-transport modelling and thermodynamic analyses of the hydration reaction zones. The relationship between estimated fluid volume and seismic moment is used to constrain magnitude. We compared estimated values with the results provided by fluid injection experiments. We find that the durations of fluid infiltration in our fluid–rock reaction zones are similar to the durations of some slow-slip events, such as tremors (~10 h). We find that fluid flux in the lower–middle crust likely limited by the depth and consistent difference in hydraulic properties compared with experiments in the more permeable upper crust. However, single fracture in the lower–middle crust still an effective pathway to transfer enough fluids to trigger low magnitude seismic event.

Keywords: Crustal Fracturing, Fluid Flux, Thermodynamic modeling, Reaction Zone

Флюидный механизм образования трещин в нижних и средних слоях коры, заключенный в метаморфических зонах взаимодействия.

Миндалева Диана, Масаоки Уно и Нориёси Цучия

*Университет Тохоку, Высшая школа экологических исследований, Сендай, Япония,
Арамаки-аза-Аоба, 6-6-20, Сендай 980-8579, Япония*

Флюидный поток в Земной коре вызывает реакции гидратации, которые вызывают перенос массы и тепла, а также изменяют гидрологические свойства горных пород. Увеличение флюидного давления вызывает увеличение проницаемости и разрушение породы. Новообразованные трещины обеспечивают пути для инфильтрации флюида. Такая активность флюида может быть связана с формированием землетрясений (Кацумата и Камае, 2003; Обара и др., 2004 г.). Однако количество флюидных потоков и проницаемость земной коры не безграничны, особенно в отношении ее временной и пространственной неоднородности (Кириухин, 2020). Следовательно, для понимания роли флюидов в сейсмических событиях, эволюции проницаемости и взаимодействию воды и породы в земной коре важно ограничить количество потоков флюидов.

В данной работе мы сосредотачиваемся на флюидном потоке в отдельном разломе и сопоставим эти результаты с серией низко-магнитудных событий, во время которых образовались трещины, такими как как тремор, чтобы предоставить новое понимание образования трещин и взаимодействия флюид-порода в нижней и средней коре. Особенно мы проанализируем уникальное геологическое и геохимическое событие, заключенное в зоне взаимодействия флюид-порода, с целью расчета продолжительности инфильтрации флюида и интегрированных во времени потоков флюида, а затем оценки генерируемого сейсмического момента и величины флюидного потока. Это исследование основано на доказательствах быстрой инфильтрации флюида (~ 10 ч) и изменении проницаемости пород от низкой до высокой ($\sim 10^{-9}$ – 10^{-8} m²), в связи с образованием трещин в земной коре на глубине около 10–20 км (Миндалева и др., 2020). Мы рассчитали интегрированные во времени флюидные потоки как сквозь, так и перпендикулярно данной трещине и всей зоне взаимодействия флюид-порода. Мы представляем новый метод расчета объема флюида необходимого для того чтобы спродуцировать сейсмическую активность, связанную с флюидом, с помощью моделирования реактивного переноса и термодинамического анализа зон реакции гидратации. Связь между расчетным флюидным объемом и сейсмическим моментом используется для ограничения магнитуды. Мы сравнили расчетные значения с результатами экспериментов по нагнетанию флюида. Мы обнаружили, что продолжительность инфильтрации флюида в зонах взаимодействия флюид-порода аналогична продолжительности некоторых событий с медленным сдвигом, такими как тремор (~ 10 ч). Мы обнаружили, что флюидный поток в нижней и средней коре, вероятно, ограничен глубиной и постоянной разницей в гидравлических свойствах по сравнению с экспериментами в более проницаемой верхней коре. Однако единичная трещина в нижней и средней коре все еще является эффективным путем для переноса достаточного количества флюидов, чтобы вызвать сейсмическое событие низкой магнитуды.

Ключевые слова: образование трещин в коре, флюидный поток, термодинамическое моделирование, зона взаимодействия

Introduction

Fluid flow in the crust related to earthquake triggering. Recent geophysical observations suggest that cyclic fluid infiltration associated with slow-slip events. The durations of these events can range from seconds to years, and they detected in a various geological setting. One of the examples of slow slip event is seismic tremor, which has been detected in subduction zones and outside. Evidence of fluid activity preserved in fluid–rock reaction zones can be used to better understanding the mechanisms of fluid infiltration and rock fracturing. This fracturing promotes the permeability and allows additional fluid transport pathways that possibly trigger seismicity. Fluid infiltration cycles and permeability increase in the overlying crust may control such processes.

It is important to quantify the amount of fluid transport in the crust, to estimate the time-integrated fluid fluxes through the fractured crust. Here we constrain the time-integrated fluid fluxes through fractured crust by thermodynamic modelling of fluid chemistry, and mass transfer and

hydraulic analyses to investigate the potential relationship between fluid behaviour and local seismic events. We use a range of samples contain clear single fractures and surrounding hydration zones that provide unique information about fluid infiltration.

Geological background and samples

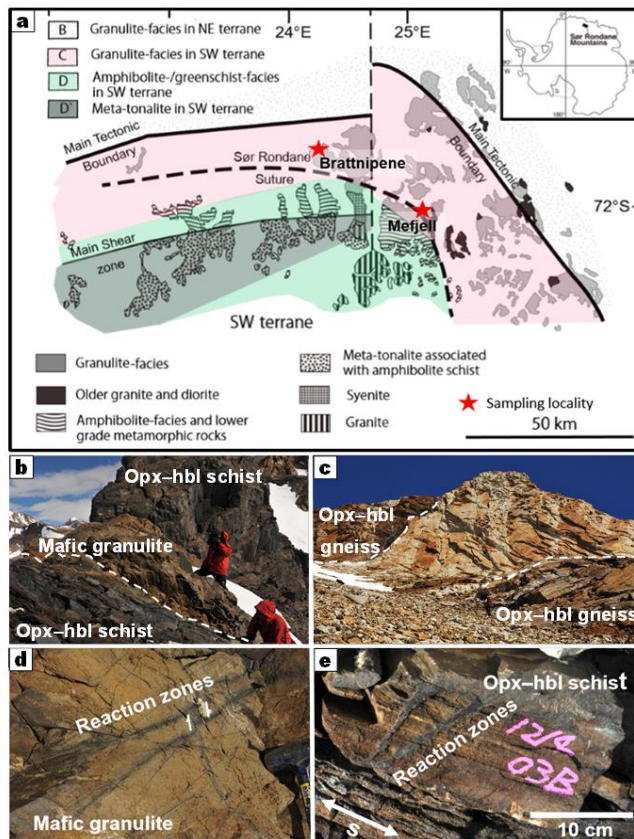


Figure 1 – (a) Geological map of the Sør Rondane Mountains (modified after Kawakami et al., 2017; Osanai et al., 2013). The red stars denote the sampling localities. (b) Photographs of partly hydrated mafic granulite and opx–hbl schist. The white dashed lines indicate the boundaries between mafic granulite and opx–hbl schist. (c) Photographs of partly hydrated opx–hbl gneiss. (d) Reaction zones in mafic granulite. (e) Opx–hbl schist, with the white arrow indicating the schistosity

Discussion

We calculated time-integrated fluid fluxes through fractured crust to understand the amount of fluid that could be transported through a single fracture and the amount of fluid that could potentially be stored in the reaction zone, respectively. The time-integrated fluid flux through the fractures was estimated from the fluid flux required for Si alteration in the reaction zones (Q_{FR}^{Si} ; $m^3 m^{-2}$) and the fluid flux estimated from the hydraulic permeability of the fracture, which is geometrically constrained from the fracture aperture (Q_{FR}^{Hyd} ; $m^3 m^{-2}$). Si solubilities depend on gradients in temperature and pressure in metamorphic rocks due to dissolution-precipitation processes and fluid composition constantly changing. Therefore, the modal mineralogy of the reaction zones in analysed samples undergoing decompression cooling depends on the Si solubility in fluids. The elemental solubilities for each sample were calculated for the bulk composition of each reaction zone under varying P–T conditions, and Si was chosen to estimate the fluid fluxes.

Figure 2 shows the total durations of the earthquake swarms, short-term slow slip events (SSEs), episodic tremor and slip events (ETS) and very-low-frequency earthquakes (VLFES). The average durations of these swarms ranged from hours to weeks. The data from ETS detected in the Nankai subduction zone indicate that clusters with > 10 tremors have durations of 1–8 days.

Figure 1 shows geological map of the Sør Rondane Mountains, (SRM), East Antarctica. The SRM (22–28° E, 71.5–72.5° S) are divided into the northeastern (NE) and southwestern (SW) terranes by the Main Tectonic Boundary (Fig. 1). Amphibolite- to greenschist-facies metamorphic rocks of the SW terrane exhibit island arc or continental arc features.

Mafic granulite and orthopyroxene–hornblende (opx–hbl) schist samples from the Mefjell plutonic complex, and orthopyroxene–hornblende (opx–hbl) gneiss samples from Brattnipene, are analysed (Fig. 1). Samples were partly hydrated under upper-amphibolite-granulite facies conditions, and fluid–rock reaction zones were analysed to constrain the fluid infiltration timescales by applying a reactive transport model based on the diffusion–advection equation with local equilibrium to the chlorine profiles measured in apatite or amphibole. Timescales as short as tens of hours (~1–14 h) estimated for all samples. The permeability of the wall rock estimated to be $\sim 10^{-22}$ – 10^{-20} m^2 , and single fracture permeability estimated to be 10^{-9} – 10^{-8} m^2 from the Poiseuille law for all analysed samples.

However, the duration is correlated with the number of tremors in a cluster; these observations suggest that a single event could potentially last for ~1 h.

The estimated timescales of fluid infiltration from the reaction zones represent the total duration of fluid activity in the region. The duration of fluid activity can be compared with the duration of various seismic events that were estimated from geophysical data (Fig. 2). The upper ranges of the estimated timescales are comparable to the durations of megathrust swarms, SSEs, LFEs and ETS clusters. Fluid activity in the reaction zones may be related to short seismic events, such as tremor, as suggested from the estimated duration.

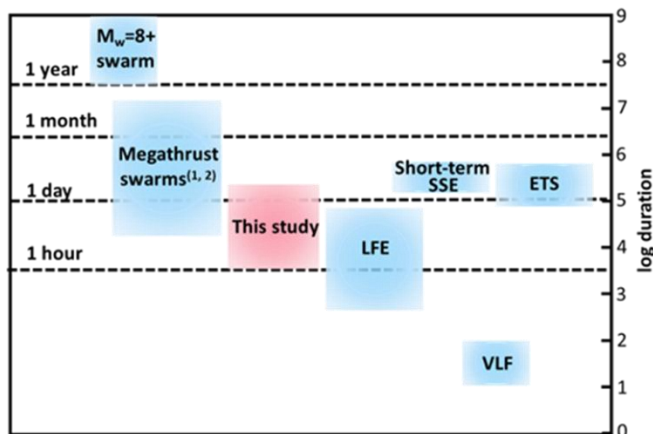


Figure 2 – Event durations for earthquake swarms and slow earthquakes. The duration is defined as the time between the first and last events in the swarm or sequence. The sources of the presented data are as follows: group (1) megathrust swarm and Mw 8+ swarm: Holtkamp and Brudzinski (2011); group (2) megathrust swarm (2): Fasola et al. (2019); short-term SSEs (slow-slip events) and VLFs (very-low-frequency earthquakes): Obara and Kato (2016); ETS (episodic tremor and slip events): Keita et al. (2021)

Conclusion

We present new methodology based on alteration processes in the reaction zone estimating the fluid volume required to induce fluid-driven seismic activity via coupled reactive-transport modelling and thermodynamic analyses. We evaluate the moment magnitude of potential seismic events by applying two approaches, based on estimated fluid volumes (10^2 to 10^4 m³) and on the shear fractures characteristics, such as slip geometry. We find that moment magnitudes, short fluid infiltration timescales (~10 h) are comparable to some tremor and/or slow-slip events within continental crust. Our observation corresponds to the depth of ~10–20 km, and are shallower than source region of tremor and slow-slip events. Thus, we conclude that large amount of fluid transported over short timescales through the single fracture may be widespread mechanism to generate crustal fracturing and induce seismic activity in the lower–middle crust.

The reported study was funded by RFR and JSPS according to the research project 21–55–50003 «Magma fracking and Fluid Flows in Volcanic Structures»

References

1. Fasola S.L. Hydraulic fracture injection strategy influences the probability of earthquakes in the Eagle Ford shale play of South Texas. / S.L. Fasola, M.P. Brudzinski, R.J. Skoumal et al. // Geophysical Research Letters. 2019. 46(22). P.12958–12967.
2. Holtkamp S.G. Earthquake swarms in circum-Pacific subduction zones. / S.G. Holtkamp, M.R. Brudzinski // Earth and Planetary Science Letters. 2011. 305(1–2). pp. 215–225.
3. Katsumata A. Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan. / A. Katsumata, N. Kamaya // Geophysical Research Letters. 2003. 30(1). pp. 20–21.
4. Kawakami T. Prograde infiltration of Cl-rich fluid into the granulitic continental crust from a collision zone in East Antarctica (Perlebandet, Sør Rondane Mountains). / T. Kawakami, F. Higashino, E. Skrzypek et al. // Lithos. 2017. 274. pp. 73–92.
5. Keita N. Cascading rupture of patches of high seismic energy release controls the growth process of episodic tremor and slip events. / N. Keita, H. Yoshihiro, U. Takahiko et al. // Earth, Planets and Space (Online). 2021. 73(1).

6. *Mindaleva D.* Rapid fluid infiltration and permeability enhancement during middle–lower crustal fracturing: Evidence from amphibolite–granulite-facies fluid–rock reaction zones, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. / *D. Mindaleva, M. Uno, F. Higashino et al.* // *Lithos*. 2020. 372. pp. 105521.
7. *Obara K.* Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone. / *K. Obara, H. Hirose, F. Yamamizu, K. Kasahara* // *Geophysical Research Letters*. 2004. 31(23).
8. *Obara K.* 2016. Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. / *K. Obara, A. Kato* // *Science*. 2016. 353(6296). P.253–257.
9. *Osanai Y.* Geologic evolution of the Sør Rondane Mountains, East Antarctica: collision tectonics proposed based on metamorphic processes and magnetic anomalies. / *Y. Osanai, Y. Nogi, S. Baba et al.* // *Precambrian Research*. 2013. 234. P.8–29.
10. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

УДК 550.341.5

Inflow of magmatic gases into the Mutnovsky geothermal reservoir according to observations of P_{CO_2} at the condenser of the GEOPP in 2019–2020

Andrey Polyakov

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

The change in the content of non-condensed gas (NCG) at the turbine generator of a geothermal power plant represents the average characteristics of the change in the inflow of magmatic gases into the productive geothermal reservoir as a whole. The results obtained show the real possibility of using data of the partial pressure of the NCG at the GeoPP condenser for predicting the magmatic activity of the Mutnovsky volcano.

Keywords: NCG, monitoring, magmatic gas, geothermal reservoir, volcano

Приток магматических газов в Мутновский геотермальный резервуар по данным наблюдений P_{CO_2} на конденсаторе ГеоЭС в 2019–2020 гг.

А.Ю. Поляков

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Изменение содержания неконденсированного газа (НКГ) на турбогенераторе геотермальной электростанции отражает усредненные характеристики изменения притока магматических газов в продуктивный геотермальный резервуар в целом. Полученные результаты показывают реальную возможность использования данных по парциальному давлению НКГ на конденсаторе ГеоЭС для прогноза магматической активности Мутновского вулкана.

Ключевые слова: НКГ, мониторинг, магматический газ, геотермальный резервуар, вулкан

Введение

Непрерывные измерения содержания неконденсированного газа (НКГ) на турбогенераторе геотермальной электростанции проводились с целью наблюдений за динамикой поступления магматического газа в продуктивный геотермальный резервуар в связи с прогнозом активности Мутновского вулкана и сильных землетрясений. Работа является продолжением исследований опубликованных (Кирюхин и др., 2002, Кирюхин и др., 2006).

Удаленный мониторинг

Система дистанционного мониторинга создана на базе станции HOBO RX 3000, производства Onset Computer Corporation (США) <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/rx3000> и описана в (Поляков, 2020).

Для оценки парциального P_{CO_2} были проведены одновременные измерения давления конденсата пара P_c и его температуры T_c ; затем P_{CO_2} рассчитывали как разницу между P_c и давлением насыщения водяного пара, соответствующими температуре T_c , зависимость была определена аппроксимацией табличных данных.

На (Рис. 1) показано временное изменение P_{CO_2} в течение периода наблюдений с 23.08.2019 по 25.09.2019. Хорошо видно, что по меньшей мере 14 максимумов P_{CO_2} синхронизированы с 14 минимумами T_c , которые демонстрируют поступление неконденсируемого газа в турбину из эксплуатационного геотермального резервуара. Некоторые из этих пиков P_{CO_2} могут быть связаны с импульсами разгрузки магматического газа, описанные в (Kiryukhin et al, 2020).

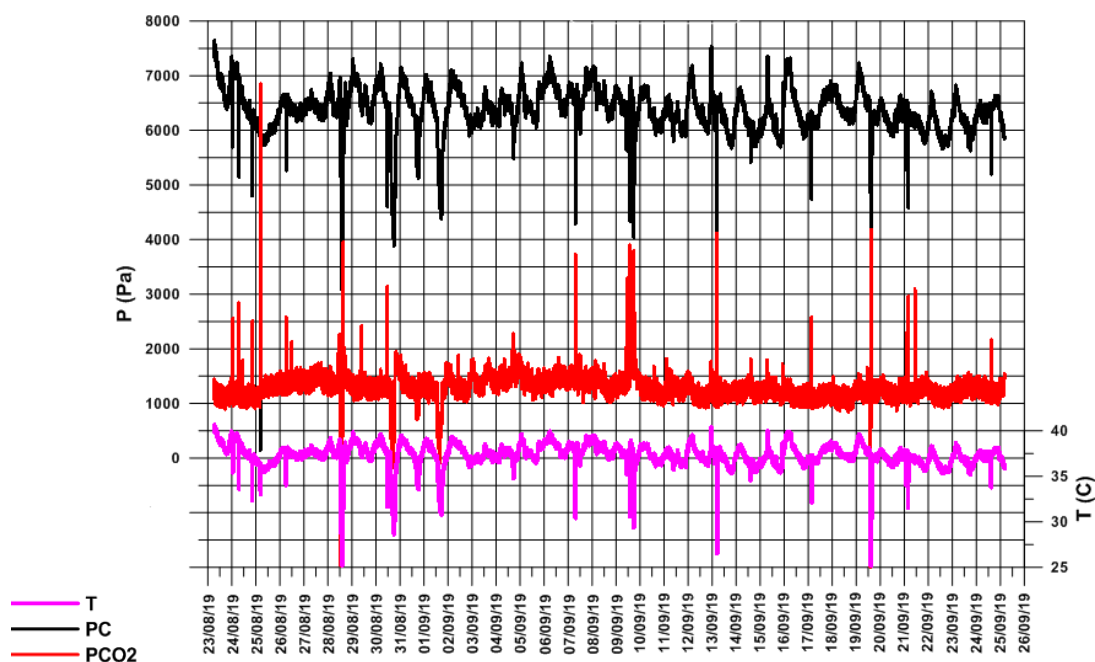


Рисунок 1 – Расчетное парциальное давление CO_2 в конденсаторе на выходе из турбины геотермальной электростанции. T – температура конденсата пара, PC – давление конденсата пара, PCO_2 – парциальное давление НКГ в конденсаторе турбины геотермальной электростанции

Усиление магматической активности Мутновского вулкана в 2020 г.

Признаки магматического происхождения состава газа, отобранного на добычных скважинах и термопроявлениях, Мутновского геотермального месторождения, особенно на участках продуктивного резервуара, примыкающих к зонам магматической инъекции были описаны в работе (Kiryukhin et al, 2019).

Значения $\delta^{13}C$ (CO_2) в скважинах 022, 031, 035, A4 и R27 термопроявлениях Медвежье и Верхне-Мутновские, Мутновского геотермального месторождения варьируются в диапазоне от $-8,4$ до $-5,6$ ‰, что свидетельствует о магматическом происхождении CO_2 (Kiryukhin et al, 2019).

Исследование гипоцентрального поля землетрясений на основе анализа плоскоориентированных кластеров (Кирюхин и др., 2018, Кирюхин 2020). Данное направление важно для определения связи гипоцентрального поля сейсмоактивной среды и ее геолого-тектонического строения в виде плоских сейсмогенных разломов предположительно активируемых глубинными флюидами. Такое представление позволяет концептуально объяснить многие эффекты сейсмичности: ее цикличность, влияние и взаимосвязь удаленных сильнейших, в том числе – глубоких, землетрясений, выявленную связь сейсмичности и вулканизма.

В апреле – июле 2020 г. на Мутновском геотермальном месторождении землетрясений (по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН) регистрировалось значительное увеличение числа микроземлетрясений (порядка 300, при среднегодовом около 250).

Гидрогеомеханический анализ локальной сейсмичности в пределах Мутновско-Гореловской группы вулканов по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, за этот период, с использованием ПО Frac-Digger (RU #Reg. 2016616880), выявил инъекции магмы из Мутновского вулкана в виде девяти даек, на глубинах от 0 до –4 км (Рис. 2)

Определение содержания НКГ на турбогенераторе геотермальной электростанции по технологическим данным ГеоЭС

Согласно технологического процесса эксплуатации ГеоЭС, на сепараторе турбогенератора производится регистрация температуры и давления с сохранением данных на внешний носитель.

Информация за первое полугодие 2020 г., предоставлена филиалом «Возобновляемая энергия» ПАО Камчатскэнерго.

Давление (абсолютное) регистрируется при помощи приборов: ЭЛЕМЕР 1040М диапазон 0–250 кПа (абсолютная погрешность 0,375 кПа) и Метран 22ДА (2040–02) (абсолютная погрешность 0,625 кПа) температура в диапазоне от 0 до 100 °С при помощи ТСПУ 3232 (абсолютная погрешность 0,25 °С), с 2 × секундным временным шагом.

Исходя из этих данных была рассчитана погрешность определения НКГ – 0,301 кПа.

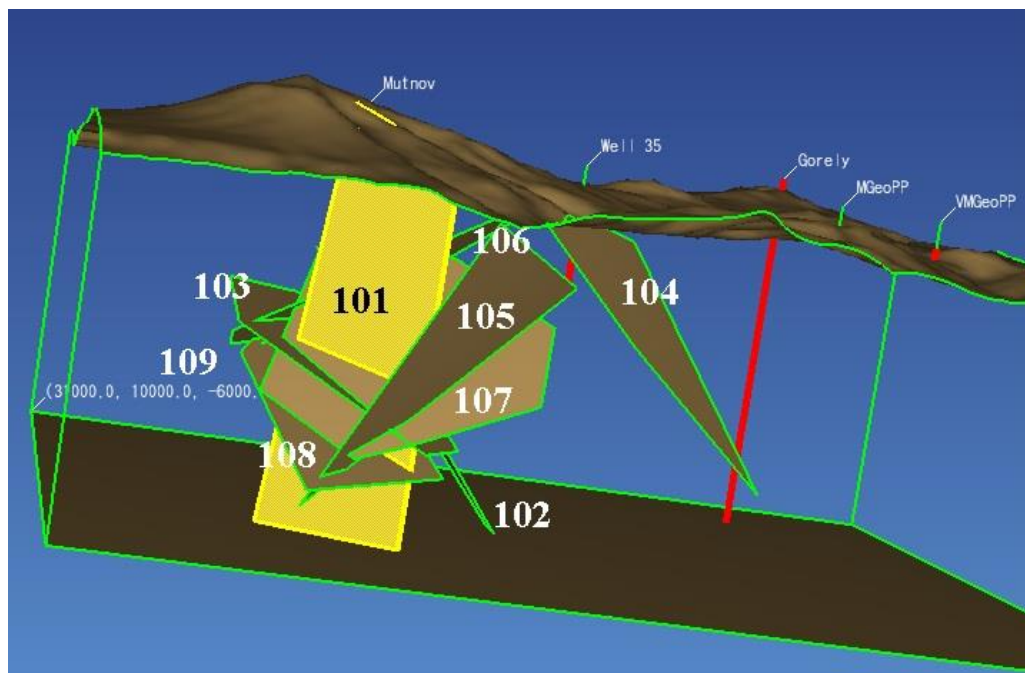


Рисунок 2 – Геометрия инъекций магмы под Мутновским вулканом по сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН за период с 01.04.2020. по 02.08.2020 г, цифрами указаны номера даек (см. Рис. 3)

Результат обработки данных ГеоЭС, по методике описанной выше, приведен на Рис. 3, синий прямоугольник погрешность определения НКГ, нами выявлено 11 интервалов времени с аномальными (повышенными) значениями P_{CO_2} .

На Рис. 3 вынесены времена начала инъекций магмы в северо-восточном секторе Мутновского вулкана с указанием магнитуды микроземлетрясений. Сопоставление магматической активности и аномалий P_{CO_2} показывает синхронизацию инъекций магмы (100, 101, 102, 104, 107, 108, 109) с аномалиями P_{CO_2} (A-F).

Выводы

Результаты тестовой работы системы дистанционного мониторинга измерения НКГ с 23.08.2019 по 25.09.2019, показали изменения усредненного суммарного содержания НКГ на турбогенераторе ГеоЭС, что может характеризовать как технологические изменения

(подключения/отключения добычных скважин, герметичность турбогенератора), так и изменения притока магматических газов в продуктивный геотермальный резервуар (дренируемый добычными геотермальными скважинами) в целом.

По данным технологических измерений (01.01.2020–30.07.2020, данные филиала «Возобновляемая энергия» ПАО Камчатскэнерго) выявлена связь между значимыми аномалиями парциального давления НКГ в конденсаторе турбины геотермальной электростанции и магматическими инъекциями.

Полученные результаты показывают реальную возможность использования данных по парциальному давлению НКГ на конденсаторе ГеоЭС для прогноза магматической активности Мутновского вулкана.

У побережья Камчатки в районе Мутновского вулкана располагается важная для сейсмологических исследований сейсмоактивная область. Эта же область относится к сейсмической брешии – наиболее вероятному месту согласно данным долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) по методу С.А. Федотова следующего сильнейшего ($M \geq 7,7$) землетрясения на Камчатке. Его сейсмический эффект в городе может достигать 8 баллов (Федотов и др., 2019).

Согласно этому прогнозу на период XII 2020 – XI 2025 гг. вероятность такого землетрясения составляет около 20 %, что в несколько раз выше средней долговременной такой вероятности.

На основе выводов указанного прогноза в полной мере сохраняется необходимость мониторинга всеми имеющимися методами геофизических процессов в указанном районе, а также принятия других неотложных мер по практическому обеспечению сейсмобезопасности и сохранности систем жизнеобеспечения в Камчатском крае.

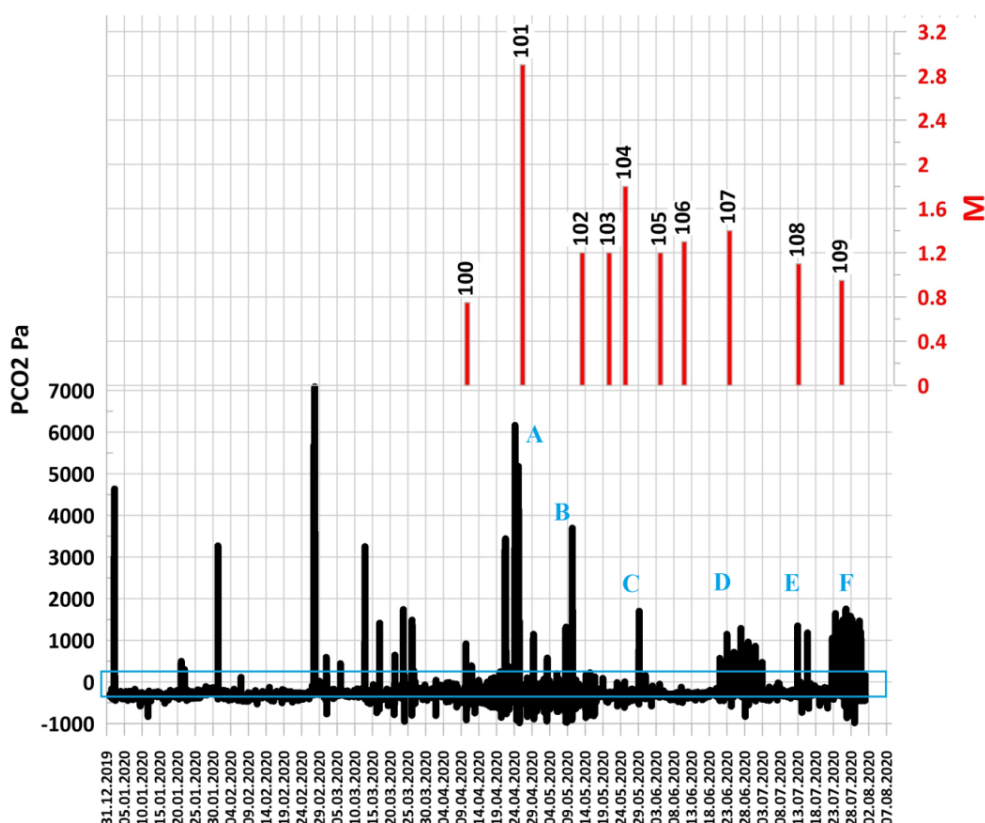


Рисунок 3 – Расчетное парциальное давление CO_2 в конденсаторе на выходе из турбины геотермальной электростанции.

PCO_2 – парциального давления НКГ в конденсаторе турбины геотермальной электростанции,
 M – магнитуда микроземлетрясений, число (100–109) – номер кластера (магматической инъекции),
 $A-F$ – аномалии PCO_2 , синий прямоугольник – погрешность определения НКГ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ_а «Магматический фракинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА–А20–120121090010–7.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью / *А.В. Кирюхин, М.Д. Лесных, А.Ю. Поляков* // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 51–60.
2. *Кирюхин А.В.* О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре / *А.В. Кирюхин, В.А. Корнеев, А.Ю. Поляков* // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 3–11.
3. *Кирюхин А.В.* Геомеханическая интерпретация сейсмичности на шельфе Камчатки: приложения для сейсмического прогноза и поиска углеводородов / *А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, А.В. Соломатин и др.* // Геомодель 2018. 20-я юбилейная конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. Геленджик, Россия. 10–14 сентября 2018 г., 2018. С. 5.
4. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019–V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017–V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП / *С.А. Федотов, А.В. Соломатин* // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6–22.
5. *Поляков А.Ю.* Удаленный мониторинг динамики поступления магматического газа в геотермальный резервуар на базе станции NOVORX 3000 / *А.Ю. Поляков* // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020), 3-8 сентября 2020 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 90–93.
6. *Kiryukhin A.V.* Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, O.O. Usacheva et al.* // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. pp. 36–55.
7. *Kiryukhin A.* Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations / *A. Kiryukhin, E. Chernykh, A. Polyakov et al.* // *Geosciences*. 2020. 10, 52. pp. 1–16. DOI: 10.3390/geosciences10020052.
8. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

CHAPTER IV. MAGMATIC SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

РАЗДЕЛ IV. МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

УДК 550.344.43

Analysis of the magmatic activity of Klyuchevskoy volcano before the lateral eruption of 2021 using the program Frac-Digger

Michail Lemzиков, Alexei Kiryukhin

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

The last summit eruption of Klyuchevskoy volcano took place from the first days of October 2020 to 8 February 2021. A collateral eruption of Klyuchevskoy volcano began on February 17, 2021 and lasted until March 20, 2021. The analysis of the magmatic activity of Klyuchevskoy volcano was carried out using the Frac-Digger program, which contains selection criteria for identifying plane-oriented clusters from the catalog of volcanic earthquakes of the Northern group of volcanoes. Some results have been obtained about dikes and forces in the area.

Keywords: Klyuchevskoy, volcanic earthquakes, clusters

Анализ магматической активности Ключевского вулкана перед латеральным извержением 2021 года с использованием программы Frac-Digger

М.В. Лемзиков, А.В. Кирюхин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Последнее вершинное извержение вулкана Ключевской происходило с первых чисел октября 2020 года по 8 февраля 2021 года, после которого произошло латеральное извержение вулкана Ключевской, которое началось 17 февраля 2021 года и закончилось 20 марта 2021 года. Во время этих двух извержений вулкана Ключевской были зарегистрированы локальные вулканические землетрясения. Анализ магматической активности вулкана Ключевского перед латеральным извержением 2021 года по данным каталога вулканических землетрясений Северной группы вулканов выполнен с использованием программы Frac-Digger, в которой заложены критерии отбора для выделения плоско-ориентированных кластеров. Получены некоторые результаты о дайках и силах в этом районе.

Ключевые слова: Ключевской, вулканические землетрясения, кластеры

Введение

Вулкан Ключевской является самым активным и самым высоким базальтовым вулканом Евразии. Его возраст около 7 тыс. лет. Современный конус самого активного вулкана Евразии – Ключевской, особенно его привершинная часть, изрезан барранкосами. В западном, северо-западном и юго-восточном секторах конус осложнен желобами, расширяющимися к вершине. Терминальные извержения происходят в кратере вулкана с максимальным диаметром 700 м, который в процессе извержений изменяет, как свою морфологию, так и размеры (Хренов и др., 1991).

Последнее латеральное извержение вулкана Ключевской произошло с 17 февраля по 20 марта 2021 года. При побочных извержениях андезибазальтовых вулканов и при трещинных извержениях в их радиальных зонах шлаковых конусов образуются новые магматические каналы, питающие эти извержения. Такие питающие магматические каналы, которые образуются перед началом извержений и во время их развития, имеют форму даек,

силлов, лакколитов и штоков. Изучение образования, строения и свойств таких тел является важными задачами вулканологии, теории формирования геотермальных, нефтяных, газовых и рудных месторождений. Целью данной работы является анализ магматической питающей системы и возможности оценки геометрии плоско-ориентированных питающих магматических каналов вулканов (даек и силлов) по сейсмическим данным перед латеральным извержением вулкана Ключевской.

Исходные данные

Для регистрации локальных вулканических землетрясений в районе Северной группы вулканов (Токарев, 1981) используется Ключевская сеть радиотелеметрических сейсмических станций Камчатского Филиала Федерального Исследовательского Центра Единой Геофизической Службы (КФ ФИЦ ЕГС РАН), которая состоит из 12 станций. Исходными данными для анализа магматической деятельности вулкана Ключевской перед его латеральным извержением является каталогом вулканических землетрясений Северной группы вулканов за 2021 год выбранный из общих данных по следующим критериям: диапазон широты 55.50 с.ш. – 56.80 с.ш.; диапазон долготы 160.00 в.д. – 161.50 в.д.; диапазон энергетического класса (Федотов, 1975) 1,5 – 11,3 (Рис. 1). Каталог вулканических землетрясений Северной группы за 2021 год содержит данные с 1 января по 20 марта 2021 года.

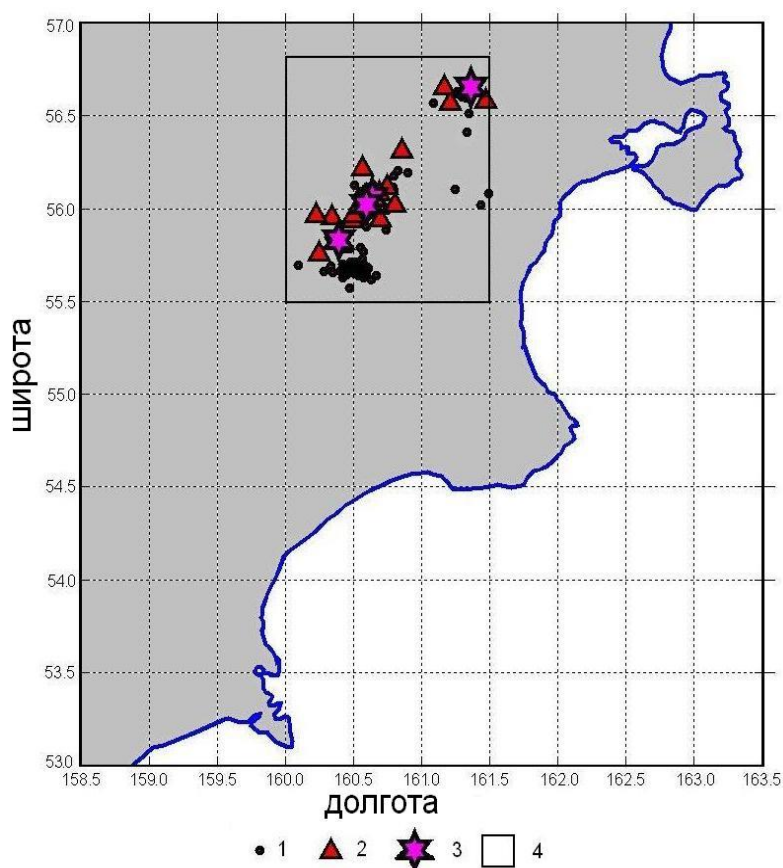


Рисунок 1 – Карта района исследования. 1 – эпицентры вулканических землетрясений вулканов Северной группы; 2 – радиотелеметрические станции; 3 – вершины вулканов; 4 – район выборки

Метод

С использованием программы JavaSEDevelopment (jdk-8u40-windows-x64) (Кирюхин и др. 2016, 2018) из каталога локальных вулканических землетрясений Северной группы вулканов за 2021 год были выделены плоско-ориентированные кластеры. Критериями сравнения для включения нового объекта в кластер были выбраны: 1) близость по времени ($\Delta t = 1$ сутки); 2) близость по расстоянию в горизонтальной плоскости ($\Delta R < 6$ км); 3) Близость к плоской ориентации (расстояние от объекта до плоскости ΔZ не более 200 м). Далее анализировались только кластеры с числом элементов более $N > 5$.

Результаты

Результаты кластеризации вулканических землетрясений Северной группы вулканов (Кирюхин, 2020) с нанесением их на разрезы по данным каталога за 2021 год, представлены на рис. 2. Магматическая деятельность Ключевского вулкана, в работе представленная в виде плоско-ориентированных кластеров различного направления, которые интерпретируется в работе как зоны внедрения даек и силлов, по которым происходит инжекция магмы. В 2021 году плоско-ориентированные кластеры больше всего расположены в конусе вулкана, чем на глубине. Каталог вулканических землетрясений в 2021 году представлен с 1 января по 29 ноября. В январе 2021 года плоско-ориентированные кластеры располагались под вулканом на глубине до 40 км. В этот период по данным лаборатории ЛИСВА (лаборатории исследования сейсмической и вулканической активности КФ ФИЦ ЕГС РАН) вулкану Ключевской был присвоен зеленый код активности. Плоско-ориентированные кластеры под вулканом на глубине 30 км и выше км появились с февраля месяца, когда по данным лаборатории ЛИСВА Ключевскому вулкану был в основном присвоен желтый и оранжевый код активности. Наибольшая активная кластеризация была представлена с мая месяца. Активность Ключевского вулкана по данным лаборатории ЛИСВА представлена на рис 3. В целом по результатам кластеризация вулканических землетрясений по данным каталога вулканических землетрясений Северной группы за 2018–2020 гг., можно увидеть, что плоско-ориентированные кластеры расположены больше всего под Ключевском вулканом, чем под вулканами Шивелуч и Безымянный.



Рисунок 2 – Активность вулкана Ключевской в 2021 году с 1-го января по 20 марта

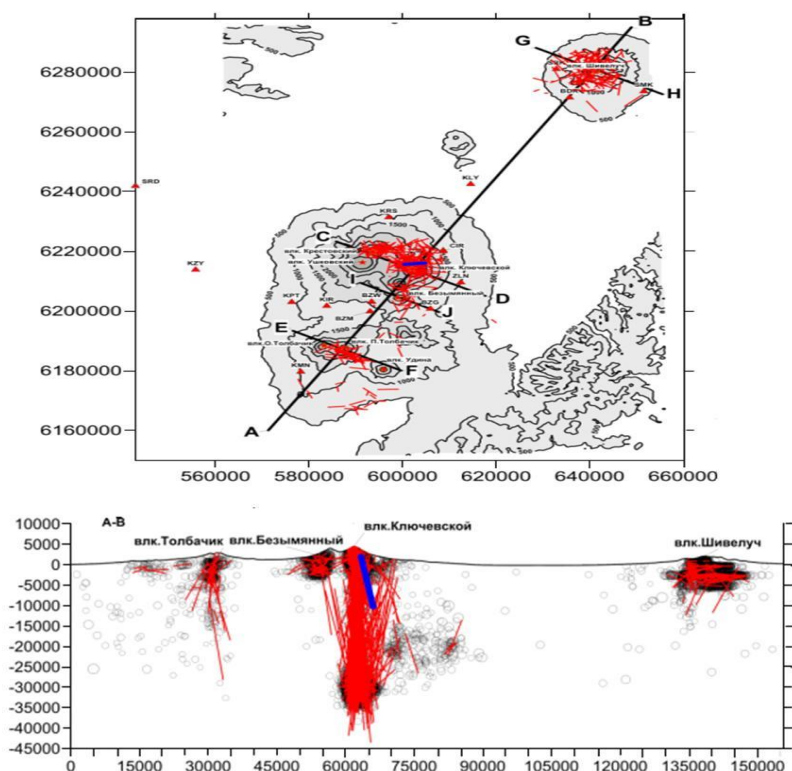


Рисунок 3 – Кластеризация вулканических землетрясений Северной группы вулканов

Таблица 1. Выделенные плоско-ориентированные кластеры землетрясений из каталога сейсмических событий по району Северной группы вулканов за 2021 г., и параметры плоскостей, их аппроксимирующих

№	Угол падения, град	Азимут падения, град	X,m	Y,m	Z М абс.	Начало кластера	N	Площадь кластера
1	4,20	158,70	601324,3	6214055,4	1275,7	01.01.2021 4:49	173	21,61
2	5,10	176,30	641957,1	6277969,3	862,4	01.01.2021 6:14	22	9,17
3	66,50	353,00	598075,0	6170204,4	-5822,8	01.01.2021 22:50	8	33,98
4	8,70	166,30	598919,1	6214726,4	1305,0	02.01.2021 14:36	21	14,04
5	12,70	176,00	602118,6	6213756,0	921,4	09.01.2021 7:07	138	16,37
6	72,80	397,60	593352,0	6171646,9	-6537,3	09.01.2021 8:31	8	48,29
7	56,90	325,80	588844,6	6186054,3	-1431,8	12.01.2021 22:11	6	13,84
8	50,70	137,50	642240,3	6278735,7	-600,8	13.01.2021 3:56	12	11,74
9	28,10	437,80	641306,6	6277909,0	358,9	18.01.2021 20:26	11	11,22
10	9,00	183,90	600137,4	6215069,1	1096,4	23.01.2021 2:04	156	21,65
11	79,80	426,80	591754,3	6169416,0	-7527,5	23.01.2021 4:52	6	70,46
12	28,60	334,00	597576,0	6169638,4	-1106,5	25.01.2021 0:50	6	14,13
13	33,00	259,30	600685,3	6214362,4	1538,2	02.02.2021 8:49	32	17,68
14	50,60	387,80	590049,0	6171051,8	-16874,5	05.02.2021 21:11	6	13,77
15	80,00	445,10	602369,9	6215671,9	-2047,3	06.02.2021 7:20	8	42,79
16	50,30	403,60	597799,6	6215721,5	924,5	08.02.2021 16:32	13	11,57
17	70,10	407,00	585801,1	6187617,0	-3966,3	10.02.2021 6:23	7	25,25
18	74,00	301,00	595945,7	6173143,4	-5035,6	12.02.2021 4:09	12	35,77
19	39,00	432,30	599219,3	6203829,1	130,4	13.02.2021 1:10	11	13,26
20	1,70	270,00	641616,2	6278059,7	893,7	18.02.2021 17:38	53	4,92

Выводы

В результате кластеризации вулканических землетрясений Северной группы вулканов по данным каталога за 2021 год перед латеральным извержением Ключевского вулкана получено значительное количество плоско-ориентированных кластеров под Ключевским вулканом. В 2021 году плоско-ориентированные кластеры расположены в основном в конусе Ключевского вулкана. Выявленные плоско-ориентированные кластеры интерпретируются как зоны внедрения даек и силлов под Ключевским вулканом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21-55-50003 ЯФ_а «Магматический фрактинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА-А20-120121090010-7.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корьякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. / *А.В. Кирюхин, С. А. Федотов, П.А. Кирюхин* // Вулканология и Сейсмология. 2016. № 5. С. 1–8.
2. *Кирюхин А.В.* Магматические системы и условия глубинной гидротермальной циркуляции Ключевской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и термогидродинамического моделирования / *А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин* // Вулканология и Сейсмология. 2018. №4. С 3–14.
3. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки / *П.И. Токарев* М.: Наука, 1981. 164с.
4. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд / *С.А. Федотов* М.: Наука, 1972. 116 с.

5. Действующие вулканы Камчатки: в 2-х т. / ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991.

6. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

УДК 551.217

Behavior of volatile components in the magmatic system of Mendeleev volcano (Kunashir Island)

Alexey Kotov¹, Sergey Smirnov², Noriyoshi Tsuchiya¹, Masaaki Uno¹

¹*Tohoku University, Graduate School of Environmental Studies, Sendai, Japan,*

²*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SR RAS, Novosibirsk, Russia
kotov.alexey.s1@dc.tohoku.ac.jp*

We present the first results of a detailed study of the mineralogy, melt and fluid inclusions in pumice from the last caldera eruption of Mendeleev volcano (Kunashir Island, Southern Kurils). Attention is paid to determining the content of volatile components in the melt and fluid involved in the evolution of the magma chamber. The results show that the dacite magma chamber was formed at a depth of 4 to 8 km at pressures of 1–2 kbar. The specific features of amphibole inclusions indicate that a possible mechanism for the formation of dacite magmas is the partial melting of amphibole-bearing lower crustal rocks. Rhyolite melts participating in the caldera eruption contained up to 6.4 wt% H₂O. The H₂O concentrations in groundmass glass is less than in melt inclusions, which indicates a significant loss of water by the melts during the eruption. Syngenetic fluid and melt inclusions, as well as the pseudo-secondary fluid inclusions, indicate degassing of melts at the stage of formation of the chamber.

Keywords: Caldera eruption, dacite, melt inclusions, amphibole, partial melting

Поведение летучих компонентов в магматической системе вулкана Менделеева (остров Кунашир)

Алексей Котов¹, Сергей Смирнов², Нориеси Цучия¹ и Масаоки Уно¹

¹*Университет Тохоку, Высшая школа экологических исследований, Сендай, Япония,*

²*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

Представляем первые результаты детального изучения минералогии, расплава и флюидных включений в пемзе последнего кальдерного извержения вулкана Менделеева (о. Кунашир, Южные Курилы). Особое внимание уделено определению содержания летучих компонентов в расплаве и флюиде, участвующих в эволюции магматического очага. Результаты показывают, что очаг дацитовой магмы сформировался на глубине от 4 до 8 км при давлениях 1–2 кбар. Особенности включений амфибола указывают на то, что возможным механизмом образования дацитовых магм является частичное плавление амфиболсодержащих пород нижней коры. Риолитовые расплавы, участвовавшие в извержении кальдеры, содержали до 6,4 мас. % H₂O. Содержание H₂O в стекле основной массы меньше, чем в расплавных включениях, что свидетельствует о значительной потере воды в расплаве во время извержения. Сингенетический флюид и расплавные включения, а также псевдоторичные флюидные включения свидетельствуют о дегазации расплавов на стадии формирования камеры.

Ключевые слова: кальдерное извержение, дацит, расплавные включения, амфибол, частичное плавление

Introduction

Volcanism associated with subduction zones is extremely diverse and interesting for research, since it allows one to study the products of eruptions from chambers formed under various evolutionary scenarios. The most interesting cases remain large caldera eruptions, which are characterized by large volumes of erupted material and, often, catastrophic consequences. Caldera eruptions are associated with volatile-rich acid magma chambers. The study of the formation and migration of felsic magmas is of great scientific interest and is inseparably connected with the study of the behavior of volatile components in magmatic systems. The Kuril-Kamchatka Island arc system is one of the most active volcanic regions in the world. However, not all its parts remain well studied. One such example is Mendeleev volcano is one of three modern active volcanoes on Kunashir Island.

In this paper, we consider the products of the latter, the last caldera eruption of Mendeleev Volcano. The age of the caldera eruption is estimated 39–41 ka using radiocarbon dating (Braitseva et al., 1995). The volume of pyroclastic material from the eruption is estimated at 60 km³ (Bazanova et al., 2016) which makes this eruption one of the largest eruptions of the Upper Pleistocene in the southern Kuril Islands. Based on a seismic study, the presence of a complex magmatic system from the upper crust to the upper mantle was established. The apical parts of the present-day hearth are located at depths of 2–3 km (Zlobnin et al., 1997).

Samples

Samples of pumice were taken from the outcrop of the pumice-pyroclastic strata of the caldera eruption on the shore of the Lagunnoe Lake. The thickness of the outcrop is 12 m. Pumice-pyroclastic is represented by alternating layers of coarse detrital (up to 40 cm) and sandy pyroclastic. The composition of the rocks corresponds to low-K dacites (Fig. 1a-c). The proportion of porphyry phenocrysts in pumice is not more than 15–20 %. Pumice contains phenocrysts of plagioclase, augite, hypersthene, magnetite, and rarely quartz. Phenocrysts are immersed in a glassy vesicular groundmass. Pumice is characterized by the absence of amphibole phenocrysts, but it was found in the form of crystalline inclusions in pyroxenes. Apatite and rare Cu-Fe sulfides were also found in the form of crystalline inclusions in porphyry phenocrysts.

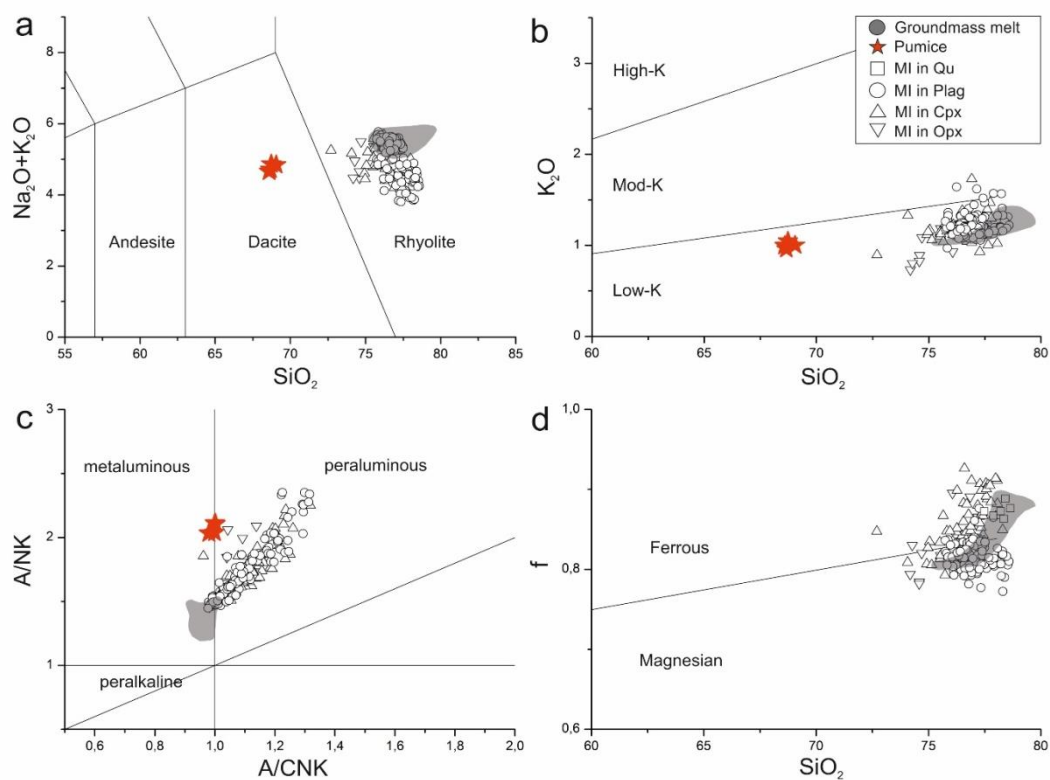


Figure 1 – Compositions of pumice, melt inclusions and groundmass glass on the classification diagrams

Mineralogy

Plagioclase predominates in the phenocryst association. Plagioclase usually has a slightly zonal structure with a composition varying in the An# 45–60 range. Mixed-type plagioclase crystals are also found. Such plagioclase has a combined core that contains blocks of An# 50–54, surrounded by plagioclase with An# 84–86, the composition of which gradually changes towards the periphery to An# 51–53. Most of the high-Ca plagioclases are found in intergrowths with clinopyroxenes containing relics of amphibole crystals. Plagioclase also occurs as inclusions in pyroxenes. This suggests that the formation of early plagioclase occurred simultaneously with pyroxenes.

The femic minerals of pumice are represented by clino- and orthopyroxenes (Fig. 2a) without zoning. Clinopyroxenes grains have augite composition, with a high content of the wollastonite fraction Wol 42–45. Al_2O_3 content varies within 1.0–2.4 wt. %, Na_2O 0.2–0.4 wt. %, Mg# varies within Mg# 71–76. Orthopyroxenes grains have hypersthene composition with Mg# 65–70, the wollastonite fraction does not exceed Woll 3. Pyroxenes are often found in the form of crystalline inclusions in each other and in early plagioclase zones. Amphibole occurs only as crystal inclusions in pyroxenes and early plagioclase. The amphibole inclusions have an irregular, melted shape. Amphibole often occurs with a melt of the same composition as primary melt inclusions from pumice phenocrysts. The composition of amphiboles corresponds to Mg-hornblende (fig. 2b). The TiO_2 content is 1.0–2.4 wt. %, the Al_2O_3 content is 6.5–9.7 wt. %. We have not found a connection between variations in the composition of amphibole and in which mineral it is enclosed.

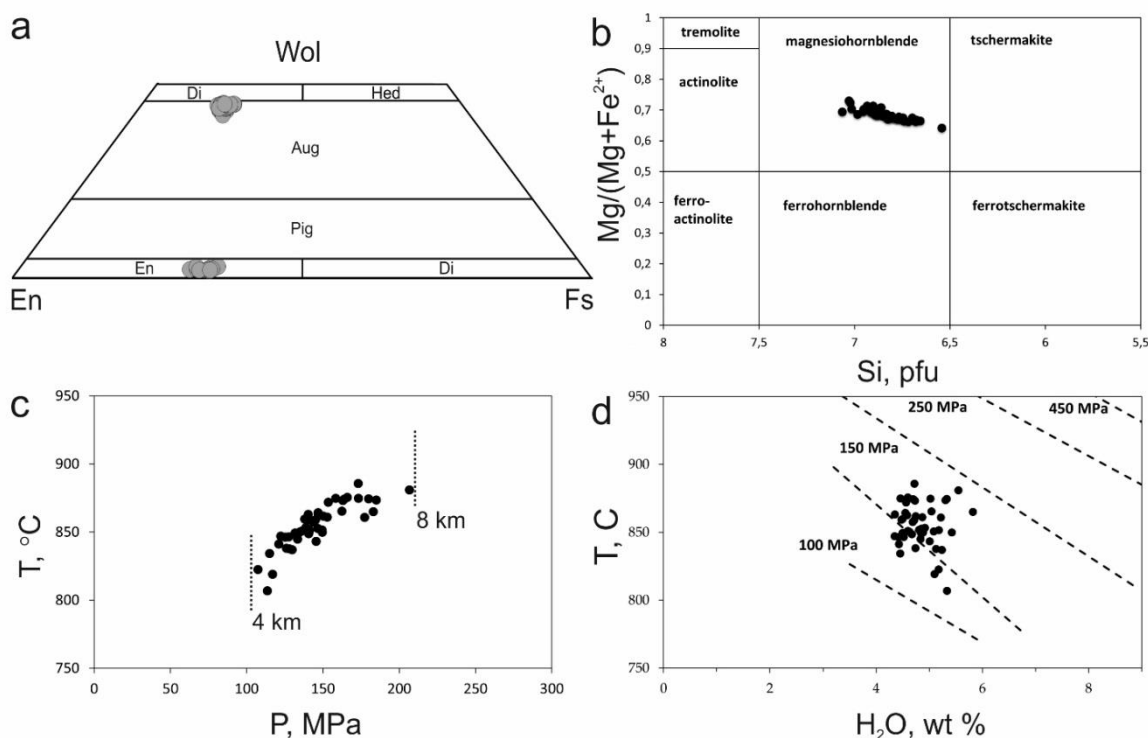


Figure 2 – Composition of femic minerals in pumice: a – classification of pyroxenes by (Morimoto et al., 1998); b – classification of amphiboles by (Leake, 1997); c, d – diagram of the stability field of amphibole from Mendeleev's pumice calculated using (Ridolfi, 2021). Dashed lines on fig. c shows calculated depths of amphibole stability calculated using the average rock density of Mendeleev volcano 2700 kg/m^3

Melt Inclusions

Pumice minerals contains many primary melt inclusions (MI) presented by transparent glass and sometimes a shrinkage bubble. Raman spectroscopy of the shrinkage bubbles did not show the presence of volatiles in them. MI's compositions correspond to low-K peraluminous rhyolites (fig. 1 a-d). MI's have a higher SiO_2 concentration than the whole-rock composition and almost do not

differ in the content of alkalis. The groundmass glass composition is low-K metaluminous rhyolite. Compared to MI's, groundmass show a slight enrichment in SiO₂ and Na₂O.

The most important part of this study is determination of volatile content in melts that involved in the eruption. Using method of Raman spectroscopy (Kotov et al., 2021), we estimated water concentration in melts. The water contents in MI's vary from 2.9–6.4 wt. % H₂O. The groundmass glass contains 2.3–3.7 wt. % H₂O, which indicates a significant loss of volatiles during the eruption. Also, using the EPMA we determined that Cl concentration in MI vary from 0.13–0.28 wt. %, SO₃ vary from 0.02–0.06 wt. %, The groundmass contain 0.14–0.25 wt. % Cl and 0.01–0.04 wt. % SO₃.

We also found combined melt inclusions. Such inclusions are represented by melt, trapped crystals and gas bubble or sometimes two-phase fluid segregations (liquid+gas bubble) (Fig. 3a). Trapped crystals are usually represented by clinopyroxene and/or magnetite. The finds of combined inclusions indicate intensive degassing processes, when the water content in the melts exceeded the saturation limit and degassing took place with the separation of the fluid phase from the melt, which was trapped together with the MI during the growth of the mineral. The cryometric experiment of combined inclusions shows that the melting temperature of ice in such segregations varies from –2.1 °C to –2.4 °C, which indicates the low salinity of the aqueous solution. Combined inclusions with two-phase fluid segregations are the most interesting find. At room temperature, these segregations contain liquid and gas, like fluid inclusions, but at the same time they have a much larger volume fraction of the liquid phase. Two-phase segregations in combined inclusions may indicate that after inclusions trapping, a decrease in pressure and/or temperature occurred, which led to the release of additional portions of aqueous fluid from the trapped melt to segregations, increasing their density. The presence of MI with dense fluid segregations is in good agreement with high water contents in melt inclusions and may indicate that the fluid pressure in the chamber could exceed the lithostatic

Fluid inclusions

Phenocrysts of pumice also contains rare fluid inclusions (FI). All of them are found in clinopyroxene or plagioclase. All FI's can be divided into two types: primary and pseudo-secondary. Primary FI's are rare, trapped always in association with primary MI and are always represented by gas and liquid (Fig. 3b). The gas phase always predominates in volume and is represented by CO₂, whose density does not exceed 0.015 g/cm³ (using calibration by Mironov et al., 2020). A cryometric experiment was not carried out for such FI, however, the Raman spectra indicate that the liquid is represented by a slightly saline aqueous solution.

Pseudo-secondary inclusions form chains marking healed cracks, which are clearly limited to the growth surface enclosed within the crystal. In terms of phase composition, such inclusions are essentially gaseous and are represented by a gas bubble and a rim of an aqueous solution. In a cryometric experiment, the melting point of ice in such segregations varies from –1.9 °C to –2.1 °C, which is slightly higher than in combined inclusions and indicates a lower salinity of the aqueous solution. It has been established by Raman spectroscopy that the gas phase is always CO₂. The density of CO₂ in pseudo-secondary inclusions varies within the range of 0.006–0.012 g/cm³. All this indicates that during the crystallization of plagioclase, the melts underwent degassing.

Results

We found that the last caldera eruption of the volcano took place with the participation of dacite magma. Rhyolite melts that are part of the dacite magma contain 2.9–6.4 wt. % H₂O. The groundmass glass contains 2.3–3.7 wt. % H₂O, which indicates a significant loss of volatiles during the eruption. During evolution, the magma chamber experienced degassing stages that were not associated with the final major eruption, as indicated by the presence of primary and pseudo-secondary FI's. The peculiarity of the amphibole suggest that the formation of the chamber took place at shallow depths, while the amphibole is relict, remaining after the melting of the lower crustal amphibole-bearing rocks. The pressure estimates using amphibole barometer vary within 1.0–2.0 kbar. Considering that the average density of the upper crustal rocks is 2700 kg/m³, we estimate

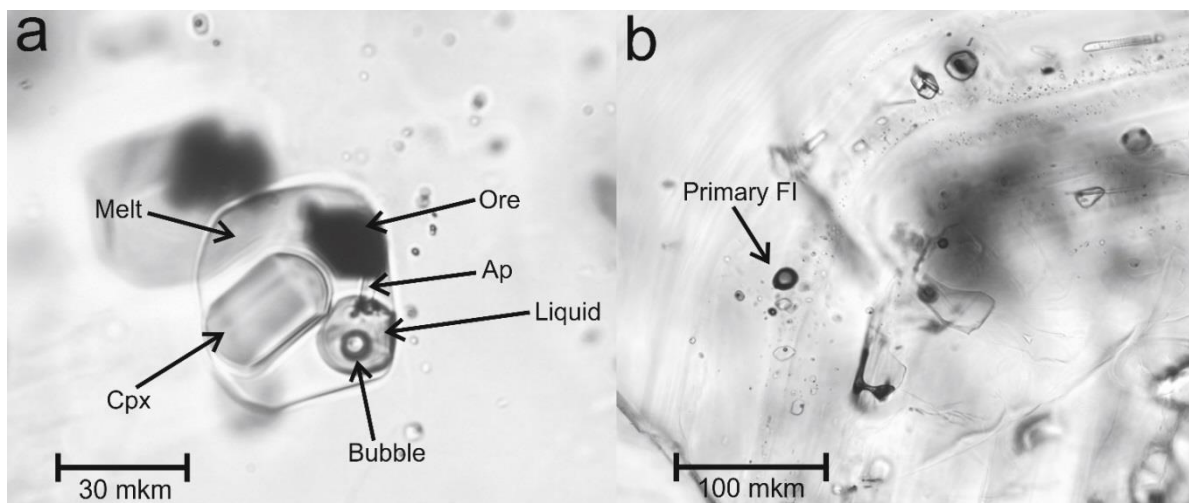


Figure 3 – Photographs of inclusions in plagioclase: a – combined inclusions with melt, clinopyroxene, ore mineral, apatite, and two-phase fluid segregation; b – primary fluid inclusion in plagioclase in one zone with syngenetic melt inclusions

the formation depth of the source at depths of 4–8 km (Fig. 2c). This is in good agreement with the seismic studies of Mendeleev volcano by the (Zlobnin et al., 1997), that shown the presence of magmatic system under the volcano at depths of 3–9 km. Thus, it can be assumed that the formation of significant volumes of dacite magmas in the upper crust of Kunashir Island and the accumulation of water in them occurs due to the thermal destruction of crustal amphibole-bearing rocks, when high-temperature deep magmas are introduced into the crust of the islands. At the same time, we do not exclude that these high-temperature magmas also bring significant amounts of water with them.

The reported study was funded by RFBR and JSPS according to the research project 21–55–50003 «Magma fracking and Fluid Flows in Volcanic Structures»

References

1. Braitseva O.A. Ages of caldera, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia / O.A. Braitseva, I.V. Meleketstsev, V.V. Ponomareva et al. // Bulletin of Volcanology. 1995. 57. pp. 383–402.
2. Bazanova L.I. Late Pleistocene and Holocene volcanic catastrophes in Kamchatka and in the Kuril Islands. Part 1. Types and classes of catastrophic eruptions as the leading components of volcanic catastrophism, / L.I. Bazanova, I.V. Meleketstsev, V.V. Ponomareva et al. // Journal of Volcanology and Seismology. 2016. 10. 151–169.
3. Zlobin T.K. Deep seismic study of Mendeleev volcano, Kunashir Island, / T.K. Zlobin, A.I. Abdurakhmanov, L.M. Zlobina // Russian Journal of Pacific Geology. 1997. 16(4). 79–87.
4. Ridolfi F. Amp-TB2: An update Model for Calcic Amphibole Thermobarometry // Minerals. 2021. 11(3). 324.
5. Kotov A.A. Method for Determining Water Content in Natural Rhyolitic Melts by Raman Spectroscopy and Electron Microprobe Analysis, / A.A. Kotov, S.Z. Smirnov, P.Y. Plechov et al. // Petrology. 2021. 29(4). 386–403.
6. Mironov N.L. Estimation of CO₂ Content in the Gas Phase of Melt Inclusions Using Raman Spectroscopy: Case Study of Inclusions in Olivine from the Karymsky Volcano (Kamchatka), / N.L. Mironov, D.P. Tobelko, S.Z. Smirnov et al. // Russian Geology and Geophysics. 2020. 61(5–6). 600–610.

Carbon isotopy as an indicator of fluid-magma interaction conditions

Sergey Voropaev, Vyacheslav Sevastyanov, Nikita Dushenko, Veniamin Fedulov

*Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (Vernadsky) RAS, Moscow Russia
voropaev@geokhi.ru*

The chemical composition of volcanic gases and the isotopic composition of carbon compounds retained in the pyroclastics of the Naboko slag cone, Tolbachik, are studied in detail. The example of carbon dioxide, CO₂, shows how the composition of the magmatic fluid changed during the eruption. The crustal origin of the fluid with the subsequent addition from the thermal decomposition of near-surface organic matter is determined.

Keywords: carbon, isotopy, fluid, magma, volcanoes, Tolbachik

Изотопия углерода как индикатор условий взаимодействия флюид-магма

С.А. Воропаев, В.С. Севастьянов, Н.В. Душенко, В.С. Федулов

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

Детально исследован химический состав вулканических газов и изотопный состав соединений углерода, удержанных в пирокластике шлакового конуса Набоко, Толбачик. На примере углекислого газа, CO₂, показано как менялся состав магматического флюида в ходе извержения. Определено коровое происхождение флюида с последующей добавкой от теплового разложения близповерхностной органики.

Ключевые слова: углерод, изотопия, флюид, магма, вулканы, Толбачик

Введение

Вулкан Толбачик является одним из активных современных вулканических центров Камчатки, извержения которого хорошо изучены. Самое известное и мощное из произошедших на Толбачике в историческое время, Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ), произошло в 1975 году, и сопровождалось образованием новых шлаковых конусов, лавовых полей и небольшой провальной кальдеры на вершине, возникшей на месте кратера. Последующее, Трещинное извержение им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии на Толбачинском долу, началось 27 ноября 2012 года с открытия трещины длиной около 5 км в нескольких километрах южнее кальдеры. Трещина протянулась от прорыва 1940 года до старого шлакового конуса Красный. Активность была сосредоточена в двух расположенных на трещине центрах – Верхнем (на высоте около 2000 м) и Нижнем (на высоте около 1500 м). 4 декабря извержение ещё продолжалось, регистрировалась сильная сейсмическая активность, из Южного прорыва произошёл сильный выброс пепла высотой 4 км. Через четыре дня после начала извержения Верхний центр прекратил деятельность, создав при этом лавовый поток длиной около 9 км.

Метод изотопных исследований

Необычная геохимия излившейся базальтовой лавы с высоким содержанием K₂O, до 4 вес. %, и особенности сопутствующих минералов (Карпов и др., 2014) вызвали вопросы о составе и происхождении глубинного магматического флюида. Первая цикл исследований изотопного состава углерода лавы и пирокластике был сделан группой из ГЕОХИ РАН под руководством академика Галимова Э.М. в 2016 г. (Галимов и др., 2016) Был определен изотопный состав суммарного углерода, содержащегося в лавах извержения. Изотопный анализ проводился на масс-спектрометре Delta Plus по стандартной методике (Sevastyanov, 2014). Погрешность определения величины δ¹³C (‰), отнесенной к стандарту VPDB, составила ±0,08 ‰.

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{образец}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{стандарт}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

Образцы были представлены разными по плотности лавами и шлаками, отобранными в различных по удаленности от центра извержения местах, и охватывали период от начальной до конечной фазы извержения. Один из образцов был взят непосредственно из движущегося языка лавы и закален на воздухе. Углерод из образцов лав выделяли путем окисления при 1100 °С, при этом форму присутствия углерода в образцах не определяли.



Рисунок 1 – Общий вид образцов крупной пирокластики, шлаковый конус Набоко

Изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ был определен в интервале от $-28,9$ до $-25,3\%$. В частности, для шлака с поверхности конуса Набоко было получено значение $-27,86\%$.

Последующий более детальный анализ показал наличие сильной адсорбции атмосферного CO_2 на ювенильную поверхность пепловых частиц и лавы, что значительно сдвинуло первичный изотопный состав углерода. В ходе повторных полевых экспедиций нашей группы из лаб. Геохимии углерода к Толбачику в 2019–2020 гг. был отобран более ювенильный материал из глубинных частей лавового потока. На шлаковом склоне конуса Набоко был сделан шурф глубиной 1,5 м и взяты образцы пирокластики общим весом 5 кг. Это позволило разделить пирокластику на фракции (см. Рис. 1) – от крупной (~1 см) до очень мелкой (~1 мм), и провести отдельный анализ удерживаемых газов.

Учитывая соотношения для изотопного фракционирования углерода между CO_2 , CO и CH_4 , необходимо знать точные соотношения количеств анализируемых соединений углерода. Для этого была разработана экспериментальная установка с контролем температуры, состоящая из кварцевого реактора, термопары и панели управления (Рис. 2).

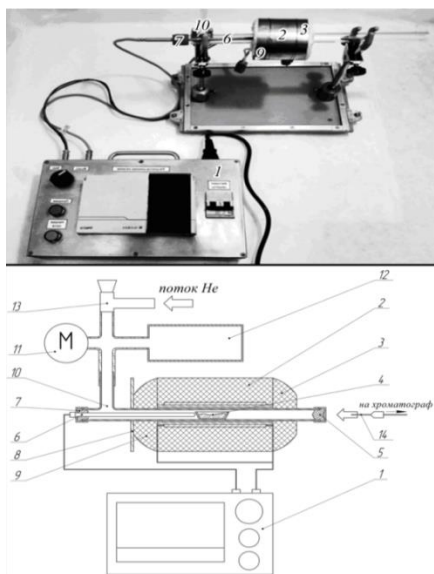


Рисунок 2 – (верх) Общий вид прибора; (низ) принципиальная схема работы:

- 1 – электронный блок управления;
- 2 – индукционный нагреватель (печь);
- 3,9 – защитный диск из теплоизоляционной ваты МКРР;
- 4 – кварцевая лодочка с загружаемым образцом;
- 5,7 – вакуумная пробка из резины со стопором для отбора газа;
- 6 – термопара (сплав Nicrobell D);
- 8 – теплоотражающий экран;
- 10 – основное тело кварцевого реактора;
- 11 – манометр;
- 12 – резервуар для выравнивания давления в замкнутом контуре с поршнем;
- 13 – вакуумный натекатель;
- 14 – игла газоплотного шприца

При проведении дегазации исследуемый образец помещали в реактор, при температуре 100 °С в течение 2-х часов выполнялась продувка гелием для освобождения от адсорбированных газов и воздушных примесей. Затем устанавливали температуру дегазации 500 °С ($\pm 1^\circ\text{C}$), удерживали при данной температуре 10 минут для максимального выхода удержанных газов, после отбирали пробу и проводили анализ состава и количества на газовом хроматографе «КристалЛюкс-4000М». Изотопный анализ газов проводился на масс-спектрометре Delta Plus с предварительным разделением смеси на газовом хроматографе HP 6890.

Результаты

Полученные данные по газам приведены в Таблице 1, где использованы образцы пирокластики разных размеров. Средняя плотность крупных частиц составила $1,34 \text{ г/см}^3$,

мелких – 1,86 г/см³, что говорит о значительной внутренней пористости крупной пирокластики. В силу существенно большего отношения внешней поверхности у мелких частиц к объему, чем у крупных (~100), они смогли удержать почти в два раза больше CO₂ и H₂O из окружавшего их газового потока. Также, показательно появление метана на поверхности мелких частиц, что свидетельствует о добавлении газов к магматическому флюиду от разложения органики вблизи поверхности.

Таблица 1. Состав удерживаемых газов в пирокластике, шлаковый конус Набоко (температура T = 500 °C)

Компонент, мкг/г	Образец	
	Крупная	Мелкая
H ₂	0,040	0,000449
CO ₂	6,072	12,043
N ₂	3,838	3,922
CH ₄	0,000	0,144
H ₂ S	0,017	0,0373
CO	0,985	0,0986
COS	0,000	0,000745
H ₂ O	11,715	23,067

Общий (валовый) изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ крупных частиц определен в интервале от –18,3 до –18,78 ‰, среднее значение –18,6 ‰. Для мелких частиц были получены значения $\delta^{13}\text{C}$ от –21,52 до –23,85 ‰, среднее значение –22,6 ‰. Учитывая различный весовой вклад CO в две фракции и изотопное фракционирование для пары CO-CO₂ при температуре 500 °C (Bottinga, 1969), можно показать, что изотопный состав CO₂, удержанный в крупных частицах, составляет –16 ‰, а на поверхности мелких –22,4‰. Известно, что, если для углекислого газа $\delta^{13}\text{C}$ (CO₂) меньше –10 ‰, то он органического происхождения; если же $\delta^{13}\text{C}$ (CO₂) больше чем –8 ‰, то неорганического (Галимов, 1967). Мантийный CO₂ обычно имеет изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ между –5 ‰ и –9 ‰; при этом $\delta^{13}\text{C}$ (CO₂) при тепловом разложении органики находится между –25 ‰ и –5 ‰. По-видимому, углекислый газ Толбачинского магматического флюида в основном корового происхождения с последующей добавкой от теплового разложения близповерхностной органики.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 19–05–00554).

Список литературы

1. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода / Э.М. Галимов. М.: Наука, 1967. 324 с.
2. Галимов Э.М. Микрокристаллические алмазы в океанической литосфере и их возможная природа / Э.М. Галимов, В.С. Севастьянов, Г.А. Карпов и др. // Доклады Академии Наук. 2016. Т. 469, № 1. С. 61–64.
3. Карпов Г.А. Минералого-петрографические особенности алмазосодержащих продуктов трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. / Г.А. Карпов, Л.П. Аникин, Г.Б. Флеров и др. // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 27–28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 1–6.
4. Bottinga Y. Calculated fractionation factors for carbon and hydrogen isotope exchange in the system calcite-carbon-dioxide-graphite-methane-hydrogen-water vapor / Y. Bottinga // Geochimica and Cosmochimica Acta. 1969. V. 33. pp. 49–64.
5. Sevastyanov V.S. Isotope ratio mass spectrometry of light gas-forming elements / V.S. Sevastyanov. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2014. 231 p.

УДК 551.222

Supply Dikes of the Feeding System of the Koryaksky Volcano (Kamchatka)

Mikhail Puzankov¹, Alexey Kiryukhin¹, Alexey Ivanov²

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
puzankov@kscnet.ru*

²*Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia*

Data on local seismicity directly in the regions of active volcanoes, in particular the Koryaksky volcano, are often interpreted as a consequence of magmatic intruding with the formation of modern dikes and sills (Kiryukhin et al., 2017 and others). At the same time, more or less complete information about the parameters of a specific real power supply system may not be available in the literature. This communication provides a description of the prepared supply dikes of the Koryaksky volcano.

Keywords: seismicity, dikes, basaltic andesites, basalts, magma, supply system

Подводящие дайки системы вулкана Корякского (Камчатка)

М. Ю. Пузанков¹, А.В. Кирюхин¹, А.В. Иванов²

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

²*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*

Локальная сейсмичность непосредственно в районах действующих вулканов, в частности вулкана Корякского, нередко интерпретируются как следствие магматического интродуирования с образованием современных даек и sillов (Кирюхин и др., 2017, Кирюхин, 2020). В то же время более или менее полные сведения о параметрах конкретной реальной питающей системы могут отсутствовать в литературных источниках. В данном сообщении приводится характеристика отпрепарированных подводящих даек Корякского вулкана.

Ключевые слова: сейсмичность, дайки, андезибазальты, базальты, магма, подводящая система

Введение

Длительно существующий, плейстоцен-голоценовый стратовулкан Корякский является геологическим телом со сравнительно сложным строением, состоящим из двух относительно самостоятельных вулканических построек. При этом более ранняя постройка, по-видимому, уже существовавшая в позднеплейстоценовое время, дважды подвергавшаяся ледниковой экзарации, большей частью погребена под более молодой постройкой. Причем нарастающий верхнеплейстоцен-голоценовый вулкан в плане и в разрезе расположен несколько эксцентрично по отношению к первому. По предварительным данным К-Аг датирования, выполненного в Институте земной коры СО РАН, возраст ранней постройки вулкана Корякского определён в 149.9 ± 82.2 тыс. лет (личное сообщение А. В. Иванова 2021 г., Институт земной коры СО РАН). По мнению авторов (Мелекесцев, Краевая, Брайцева, 1970), судя по соотношению ледниковых отложений и форм рельефа, предполагается возраст в интервале 130–50 тыс. лет назад, что примерно соответствует первой фазе плейстоценового позднеплейстоценового оледенения. История вулкана – это история его построек. Ранняя постройка – Корякский 1, относительно сильно эродирована, со множеством препарированных даек, со вскрытой жерловиной, по интенсивно расчленённому рельефу сильно отличается от второй постройки (Корякский 2) с «транзитным» (т.е. без перерыва) возрастом $Q_3^4 - Q_4$.

Ко второй, транзитной по возрасту, постройке, кроме датированных радиоуглеродным методом голоценовых лав, отнесены туфолоавовые пачки с хорошей сохранностью

первичных форм рельефа, фациально замещаемые ледниковыми отложениями второй фазы позднеплейстоценового оледенения. Базальты и андезибазальты ранней постройки петрографически и геохимически заметно и уверенно отличаются от лав второй постройки. По этим параметрам они близки к авачинским.

Отпрепарированные многочисленные дайки базальтов и андезибазальтов постройки Корякский 1 сгруппированы на относительно сильно эродированном южном склоне вулкана (Рис. 1). Извилистые дайки базальтов, андезибазальтов соединяясь друг с другом, образуют здесь фрагмент системы подводящих каналов. Простираение радиальных даек в целом север-северозападное, соединяющих их даек-перемычек – север-северо-восточное и меняется в пределах 10° , падение крутое $60-80^\circ$, причем направление падения у одной и той же дайки может меняться с восточного на западное (от 70° на запад до 60° на восток). Отдельные дайки прослеживаются вверх по склону на протяжении сотен метров. Мощности даек от 2–3 до 6–7 м. Вмещающими породами являются базальты с плагиоклаз-оливин-авгитовым набором вкрапленников и двупироксеновые андезибазальты, завершающие становление ранней постройки. В центральной части даек обнажаются массивные, пористые базальты, которые ближе к контакту переходят в оплавленную (черную) хрупкую шлаковую корку мощностью до 0,3 м. Нередко можно видеть, что дайковые тела сообщаются с послойными, а также с потоками покровной фации, т.е. непосредственно являются подводящими для них.



Рисунок 1 – Дайки базальтов и андезибазальтов постройки Корякский 1 (фото Кирюхина А В, 2020)

Предполагается, что каждый из составляющих современную постройку вулканов, обладает собственной сложной дайко-силловой системой (более поздняя наложена на предыдущую). Но степень эродированности сильно отличается: тела субвулканической фации Корякского 1 многочисленны, редки во второй постройке, а препарированные голоценовые подводящие тела – единичны. Причём, по-видимому, в связи с локализацией стратовулкана в единой региональной структуре – на северо-восточном борту

одностороннего грабена с неровным клавишным дном, наследуется некий единый деформационный план с сохранением ориентировки и форм тел его субвулканической фации. Если судить по ориентировке, морфологии даек и их внутреннему сложению, отпрепарированы, в основном, радиальные дайки, внедрявшиеся по трещинам отрыва (Ефремова, 1983) и образованные отдельными порциями расплава при подаче их на поверхность. В позднелейстоцен – голоценовое время, несомненно, происходили локальные перестройки в верхней вулканической зоне подводящей системы (Патока, Шеймович, 1989). В частности, это выразилось в миграции кратеров на вершинном гребне: по-видимому, самым древним является северный кратер (в настоящем ледниковый цирк); затем действовал восточный, запечатанный ныне андезитовой лавовой пробкой (вершина Корякского), а современный кратер расположен к западу от вершины.

Количественные соотношения эффузивно-пирокластической фации и фации внутривулканических подводящих систем для Корякского вулкана определяются весьма приблизительно – на основе наблюдений на древних, сильно эродированных вулканах (Патока, Шеймович, 1989). Так в недоступной центральной части Корякского вулкана субвулканическая фация может слагать до 80 % объема; в пределах обследованной склоновой части, с учетом большого количества побочных центров излияний, ее долю можно оценить примерно до 20 % объема (для древней постройки)

Кроме того, андезитовые дайки обнаружены в плейстоценовой части второй постройки – Корякского 2. В разрушенных шлаковых конусах на леднике Новограбленова, на ручье Перевальном (между Авачинским и Корякским вулканами) вскрыты подводящие тела, сложенные клинопироксен-оливиновыми базальтами. Обобщенная петрографическая и петрохимическая характеристика лав подводящих тел приведена в табл. 1 и 2.

Таким образом, для каждого периода становления вулканического сооружения характерна своя подводящая система. При этом в пределах одного периода лавы субвулканической и покровной фаций чаще обнаруживают сходство по петрографическому и петрохимическому составу слагающих их лав (Табл. 1). Т.е. различия по условиям становления вулканических тел были не существенными. Возможно, это обусловлено тем, что на Корякском вулкане вскрыты только тела верхней вулканической зоны, внедрявшиеся по трещинам отрыва.

Таблица 1. Петрографический состав лав некоторых голоценовых потоков Корякского вулкана

№ п/п	Возрастной индекс	Фация	Ассоциация вкрапленников и микролитов
1	Q3-1-(1)	покровная	30-50[PL+OL+Cpx]<[pl+cpx+ol+mt]
2	Q3-1-(1)	субвулканическая	20-40[PL+OL+CPX]<[pl+cpx+ol+mt]
3	Q3-1-(2)	покровная	20[PL+CPX+Opx+Ol+Mt]<[(pl+orx+cpx+mt)≤gl]
4	Q3-1-(2)	субвулканическая	10-30[PL+CPX+OPX+Mt]<[pl+cpx+orx+ol+mt]
5	Q3-4-(1)	покровная	30[PL+CPX>Opx+Mt]<[(pl+cpx+orx+mt)<'gl']
6	Q3-4-(1)	субвулканическая	20[PL>>Opx+Cpx+Mt]<[(pl+orx+cpx+mt)≥gl]
7	Q4-1	покровная	<10[OL>>CPX]<[(pl+ol+cpx+mt)]
8	Q4-1	субвулканическая	15-20[Ol+Cpx]<[pl+cpx+ol+mt]

Примечание: 1–4 – постройки вулкана Корякский 1; 5–8 – постройки вулкана Корякский 2. Приведенные возрастные индексы являются условными и будут уточнены позднее. Постройки 1–6 расположены на южных склонах вулкана Корякского. Постройки 7–8 – это полуразрушенные шлаколавовые конуса на перевале между вулканами Корякский и Авачинский (ледник Новограбленова). Буквенные обозначения PL, Pl, pl – условные обозначения минералов плагиоклаза – фенокристаллы, субфенокристы и микролиты соответственно; буквенные обозначения OPX, Opx, orx – ортопироксен; CPX, Cpx, cpx – клинопироксен; OL, Ol, ol – оливин; MT, Mt, mt – рудные минералы; gl – стекло. Начальные цифры – обозначают кристалличность лав, долю вкрапленников.

Таблица 2. Химический состав некоторых лав Корякского вулкана, мас. %

	Индекс	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
1	Q3-1-1	51,60	1,15	17,78	2,79	7,48	0,19	5,06	10,24	2,93	0,76	0,02
2	Q3-1-1	51,34	0,92	18,80	3,48	6,36	0,21	5,04	9,97	2,91	0,74	0,21
3	Q3-1-1	51,06	1,04	17,36	10,69	0,00	0,00	7,35	9,39	2,42	0,53	0,16
4	Q3-1-1	51,12	1,06	15,87	2,52	6,81	0,21	9,47	9,45	2,65	0,70	0,13
5	Q3-1-1	51,42	1,03	15,84	2,68	6,75	0,21	9,22	8,92	3,02	0,70	0,22
6	Q3-1-1	51,90	1,52	16,80	2,58	6,50	0,16	7,55	9,84	2,40	0,72	0,04
7	Q3-1-1	51,84	1,58	17,07	2,72	6,34	0,12	6,40	10,49	2,61	0,80	0,04
8	Q3-1-1	51,79	0,85	18,03	2,64	6,90	0,17	6,60	9,40	2,72	0,69	0,21
9	Q3-1-1	51,23	0,98	16,21	10,24	0,00	0,00	9,00	9,45	2,35	0,41	0,13
10	Q3-1-1	54,13	1,05	18,68	9,54	0,00	0,00	4,64	8,49	2,74	0,57	0,16
11	Q3-1-1	52,74	1,02	19,24	2,34	6,10	0,21	5,98	8,11	3,46	0,64	0,16
12	Q3-1-1	52,59	1,10	17,04	2,42	6,86	0,16	7,06	9,13	2,88	0,55	0,20
13	Q3-1-1	54,01	1,01	14,25	1,76	7,44	0,15	7,51	10,26	2,71	0,72	0,18
14	Q3-1-2	56,72	0,83	18,10	3,66	4,57	0,16	3,94	7,97	3,19	0,66	0,20
15	Q3-1-2	54,95	1,04	17,78	3,08	5,88	0,14	5,54	8,01	2,65	0,72	0,19
16	Q3-1-2	55,31	0,95	18,14	3,52	4,97	0,17	4,55	8,43	3,20	0,56	0,20
17	Q3-1-2	54,83	1,03	19,09	1,41	6,76	0,16	3,38	8,91	3,61	0,67	0,15
18	Q3-1-2	55,87	0,82	18,74	3,03	4,99	0,16	3,86	8,20	3,25	0,81	0,25
19	Q3-1-2	56,05	1,05	17,61	3,02	5,09	0,18	4,79	8,19	3,27	0,55	0,19
20	Q3-1-2	55,62	1,00	18,30	2,52	5,63	0,06	4,95	8,11	2,78	0,84	0,19
21	Q3-4-1	55,44	0,73	17,97	3,26	5,21	0,15	4,38	7,56	3,73	1,34	0,23
22	Q3-4-1	56,91	0,96	18,01	8,61	0,00	0,00	3,79	7,42	2,93	1,18	0,19
23	Q3-4-1	55,99	0,81	19,65	3,14	4,60	0,12	2,31	7,80	3,82	1,48	0,28
24	Q3-4-1	56,19	0,85	19,63	2,74	4,77	0,13	2,37	7,46	4,03	1,53	0,29
25	Q4-1	47,53	1,00	17,96	9,35	0,75	0,17	9,70	10,60	2,16	0,61	0,18
26	Q4-1	47,57	1,03	17,84	10,00	0,68	0,18	8,94	10,78	2,19	0,62	0,18
27	Q4-1	48,51	0,97	17,61	3,86	7,04	0,17	8,58	9,87	2,58	0,61	0,18
28	Q4-1	49,13	1,04	18,45	8,58	0,76	0,16	8,61	9,99	2,43	0,64	0,21

Примечание: Номера образцов 1–20 – лавы вулкана Корякский 1: 1–13 – покровная фация; 14–20 – субвулканическая фация. Номера образцов 21–28 – лавы вулкана Корякский 2: образцы №№ 21–24 – андезибазальты нормальнокалиевой серии; №№ 23–24 взяты из даек; №№ 25–28 отобраны из полуразрушенных шлаколавовых конусов магнезиальных базальтов (рядом с ледником Новограбленова); образцы под №№ 25–26 – лавовые потоки; образцы под №№ 27–28 – подводящие тела. Анализы всех образцов, кроме образцов под №№ 3, 9, 10, 22, выполнены в ЦХЛ ИВиС (РФА), пересчитаны на 100 % вместе с закисным железом. Анализы образцов под №№ 3, 9, 10, 22 (Ben Casteliana, 1998).

Список литературы

1. *Ефремова С.В.* Дайки и эндогенное оруденение / С.В. Ефремова М.: Недра, 1983. 224 с.
2. *Кирюхин А.В.* Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников / А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин и др. // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.
3. *Мелекесцев И.В.* Рельеф и отложения молодых вулканических районов Камчатки / И.В. Мелекесцев, Т.С. Краевая, О.А. Брайцева М.: Наука. 1970. 104 с.
4. *Шеймович В.С.* Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма. / В.С. Шеймович, М.Г. Патока М.: Недра, 1989. 207 с.
5. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с.
URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

Temperature and Gas Composition Dynamics of the Fumaroles of Avachinsky Volcano in 2013–early 2021

Nataliya Malik¹, Viktor Okrugin¹, Irina Lukashevskaya²

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
maliknataliya@mail.ru*

²*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

The results of studies of the Avachinsky volcano fumaroles in 2013–early 2021 are presented. The composition of fumarolic gases and its variations over time are studied. The dynamics of temperatures in 2013–21 of high-temperature fumaroles is shown.

Keywords: Avachinsky volcano fumaroles, volcanic gas, fumarolic activity monitoring

Динамика температуры и состава газа фумарол Авачинского вулкана в 2013–начале 2021 гг.

Н.А. Малик¹, В.М. Округин¹, И.Д. Лукашевская²

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

²*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006*

Представлены результаты исследований фумарол Авачинского вулкана в 2013 – начале 2021 гг. Изучен состав фумарольных газов и его вариации во времени. Показана динамика температур в 2013–21 гг. высокотемпературных фумарол.

Ключевые слова: фумаролы Авачинского вулкана, вулканический газ, мониторинг фумарольной активности

Введение

Один из активных вулканов Камчатки – Авачинский расположен поблизости от наиболее густонаселенной территории полуострова Камчатка. С 2013 г. на фумарольных полях вулкана проводятся режимные наблюдения, включающие визуальное обследование, измерение температуры, отбор газа и газового конденсата, возгонов и сублиматов.

Исследования фумарольных газов проводятся для решения как фундаментальных научных задач, таких как (1) определение вклада различных источников в формировании флюидной системы вулкана и построение его геохимической модели, (2) количественная оценка выноса летучих, в том числе соединений металлов, в окружающую среду в ходе дегазации, так и практических задач: (3) мониторинга и прогноза вулканической активности, (4) изучения геохимических процессов минералообразования и рудообразования. Исследования в рамках всех этих проблем тесно взаимосвязаны. Так, первым шагом в рамках геохимического исследования вулканической системы, направленного на мониторинг, является химическая и изотопная характеристика флюидов и построение геохимической модели; в рамках этой геохимической модели можно интерпретировать наблюдаемые изменения любого отдельного исследуемого параметра (Inguaggiato et al., 2011). Построение такой геохимической модели для Авачинского вулкана все еще не закончено из-за аналитических и других трудностей, хотя имеется химическая и изотопная характеристика газов вулкана в 1993–94 гг. (Taran et al., 1997). Но наблюдения за рядом параметров (температурой, составом газа), в первую очередь, на высокотемпературных фумаролах Западного и Восточного полей с целью мониторинга вулканической активности регулярно проводятся (Рис. 1). Реже обследуются и опробуются низкотемпературные фумарольные площадки. Детальное описание фумарольных полей и мест отбора представлено в работе (Малик и др., 2017).

Результаты

Отбор и анализ газа проводились по общепринятым в мировой вулканологии методикам, описанным в работе (Малик и др., 2017). Температура измерялась ХА-термопарой, в некоторых случаях – пирометром TemPro-1200.



Рисунок 1 – Вершина Авачинского вулкана с высокотемпературными фумарольными полями. Указаны максимальные за период наблюдения температуры. Фото А.В. Сокоренко 20.10.2014 г.

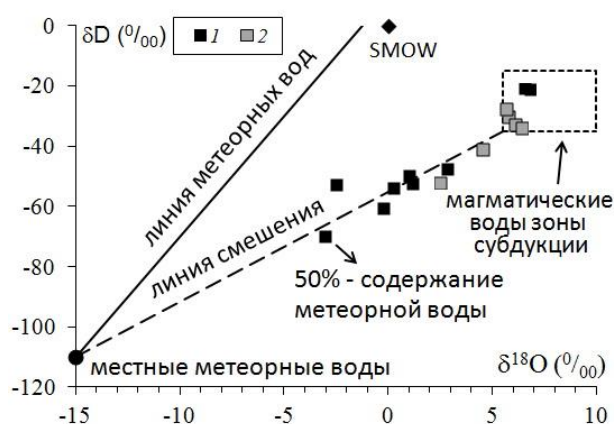


Рисунок 2 – Изотопный состав воды фумарольных газов вулкана Авачинский: 1 – пробы, отобранные в июле-сентябре 2013–2019 гг.; 2 – в апреле-мае 2013–2019 гг. SMOW – Standard Mean Ocean Water, магматические воды зоны субдукции (Таран и др., 1989)

Высокотемпературные фумаролы ($> 445\text{ }^{\circ}\text{C}$) представляют наибольший интерес для мониторинга и других задач, что связано с температурой кипения серы ($444,6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Подходящая для регулярного опробования (фумарола 1) была обнаружена летом 2013 г. на Восточном фумарольном поле, из которой проводится отбор газа 3–4 раза в год. Температура ее менялась в пределах $450\text{--}630\text{ }^{\circ}\text{C}$, но в целом с 2017 г. наблюдается понижение температуры (Рис. 3, фумарола 1).

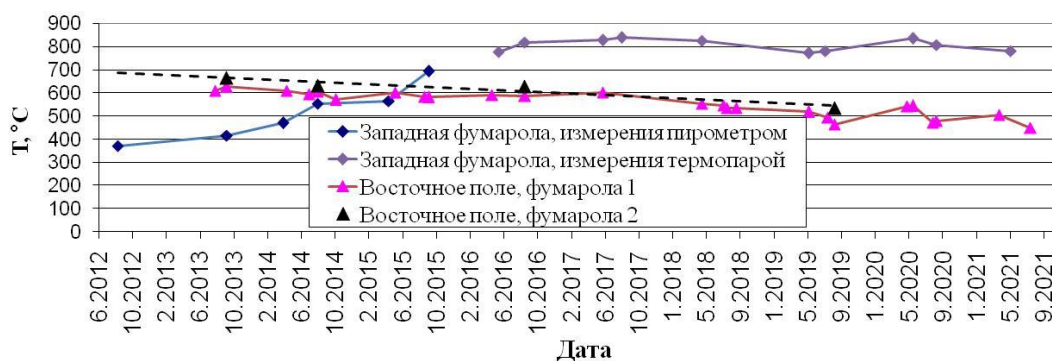


Рисунок 3 – Температура режимных фумарол Авачинского вулкана

Содержание кислорода (показатель контаминации пробы воздухом, связанной в основном с особенностями отбора) в непоглощенных щелочью газах составляло $0,6\text{--}3,0\%$ (до 10 об. %), что в пересчете на общий состав газа не превышало $0,05\text{ мол. \%}$. Так, при отборе в ампулы Гиггенбаха содержание воздуха всегда было меньше, чем при отборе в барботеры с резиновыми шлангами.

Содержание в высокотемпературных фумарольных газах Авачинского вулкана главных компонентов: CO_2 , H_2O , S_i (сумма газов серы: $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{S}$), соотношения этих компонентов, а также изотопный состав серы близки к средним значениям для высокотемпературных газов вулканов зон субдукции (например, Gerlach, 2004). Содержание галогеноводородов (HCl , HF) и соответственно отношения (HCl/S , HF/S) в ~ 5 раз ниже

средних значений для газов вулканов зон субдукции, что характерно и для других Камчатских вулканов, например Мутновский (Активная воронка). Изотопные составы воды (δD – $\delta^{18}O$) в конденсатах Авачинского вулкана, в основном отобранных в холодный сезон года, попадают в область магматических вод зон субдукции (Таран и др., 1989) (Рис. 2). Это означает, что примесь метеорного или гидротермального компонентов в фумарольных газах весьма мала, то есть высокотемпературные фумаролы вулкана Авачинский представляют собой выходы «чисто магматического» газа. Однако в пробах, отобранных в летне-осенний период, изотопный состав воды газового конденсата «сдвигался» вдоль линии смешения (магматической и метеорной воды) до 50 % содержания метеорной фракции (Рис. 2). Таким образом, наблюдаются сезонные изменения содержания метеорной воды в газе (от 0 до 50 % от общей массы воды), предположительно связанные с поступлением талых и дождевых вод в теплый сезон года. В летне-осенний период также отмечены минимумы температуры фумаролы и содержания таких газов как HCl, SO₂, H₂S, CO, максимальное содержание воды и метана. До и после периода повышенной сейсмической активности в 2014–15 гг. и за два месяца до активизации в конце 2019 г. аномальных значений физико-химических параметров данной фумаролы отмечено не было (Малик, Некрасова, 2020). В пробах газа, отобранных через 4 месяца после сейсмической активизации 2019 г. (в мае-июне 2020 г.), отмечено некоторое повышение температуры режимной фумаролы, концентраций газов серы, CO, однако эти показатели находятся в пределах сезонных колебаний и не превышают предыдущие зимне-весенние максимумы. В то же время в этих пробах отмечены максимальные за период 2013–20 гг. концентрации HCl, H₂, As, Br и отношения CO/CO₂, H₂/H₂O, превышающие предыдущие максимальные значения, наблюдавшиеся также в холодный сезон, примерно в 1,3 раза (для As в 4 раза), а средние значения для этого же сезона в 1,5 раза. В последующих пробах газа, отобранных в августе 2020 г., наблюдается характерное для летнего сезона снижение всех вышеперечисленных показателей. Отмеченные высокие значения ряда концентраций и отношений весной 2020 г. можно объяснить, как аномально высоким «весенним максимумом», связанным с уменьшением количества воды (отсутствием метеорной воды), так и активизацией в конце 2019 г.

Наиболее высокотемпературная (≤ 665 °C) фумарола на Восточном поле (фумарола 2) посещалась реже из-за ее меньшей доступности. Можно также отметить тренд понижения её температуры (Рис. 1).

В *Западной фумароле* была измерена максимальная для вулкана температура (839 °C) (Рис. 2). За период наблюдений с 2013 по 2021 гг. наиболее заметные изменения морфологии, температуры, характера выхода газа произошли на Западной фумароле, которые удалось соотнести с сейсмической активностью вулкана (Малик, Некрасова, 2020). Непосредственный отбор газа на этой фумароле трудновыполнимая задача, отношения основных компонентов газа здесь были дважды измерены с помощью портативной системы газовых сенсоров «Мультигаз» (например, Aiurra, 2010), предоставленной во временное пользование Институтом геофизики и вулканологии (Палермо, Италия). Измерения показали, что отношения (CO₂/S_t, S_t/H₂, H₂O/S_t), а значит и состав газа практически идентичны составу фумарол Восточного поля. Исключение составляет отношение SO₂/H₂S, которое в среднем в 3 раза больше для Западной фумаролы, что является следствием более высокой температуры или значительной примеси воздуха в газе.

Низкотемпературные газы на западной кромке кратера (91–93 °C) отбирались трижды, и их состав также измерялся системой «Мультигаз». Результаты, полученные разными методами очень близки. Эти газы сильно обеднены HCl и HF, умеренно обеднены S_t, CO, H₂ и обогащены CH₄ по сравнению с высокотемпературными, что вполне закономерно и может говорить о происхождении этих газов из частично конденсированных магматических газов.

Обсуждение и выводы

Составы высокотемпературных газов, включая изотопные составы воды и серы, в основном соответствуют средним составам вулканических газов островных дуг. Температура

(до 840 °С), состав и расход летучих (~200 т/сутки SO₂ в день (Мельников, Ушаков, 2013)) свидетельствуют о близости дегазирующего магматического тела. Простые расчеты на основе данных о расходе SO₂ (Мельников, Ушаков, 2013), составе газа (Малик и др., 2017), содержании воды в расплаве – 2,7 % (Vissaro et al., 2014) показывают, что только за 20 лет с 2001 г. (со времени образования трещины и появления высокотемпературных Восточного поля и Западной фумаролы), предполагая примерно одинаковый вынос газа фумаролами, объем дегазированной магмы составил около 0,6 км³. Это значительно превышает объем лавовой пробки в кратере (8,3 млн. м³), и также больше объема предполагаемого (Мелекесцев и др., 1994; Vissaro et al., 2012) малоглубинного магматического резервуара (0,3–0,5 км³). Т.о. источником газа фумарол скорее всего является магматический очаг, предполагаемый по геофизическим данным в пределах глубин 0–5 км диаметром 3–4 км (Гонтовая и др., 2011; Bushenkova et al., 2019).

Отмеченные за период наблюдений изменения на фумарольных площадках, в основном вызваны процессами в конусе вулкана. Во-первых, это сезонные изменения, которые объясняются проникновением талых и дождевых вод в теплое время года, что хорошо видно по изотопному составу воды. Во-вторых, это наиболее заметные за 2013–2021 гг. изменения морфологии, температуры, характера выхода газа на Западной фумароле, изменение соотношения расходов газа 2-х высокотемпературных полей, которые удалось соотнести с сейсмической активностью вулкана, причем гипоцентры большей части событий (80–85 %) располагались в постройке вулкана (–2,6–0 км) (Малик, Некрасова, 2020). Возможная причина этих процессов – изменение проницаемости среды, например, в результате гидротермального изменения пород, и охлаждение одних частей кратера, и усиление потока газа в других, что приводит к трещинообразованию, повышенной сейсмичности в постройке вулкана (Harris et al., 2012). Однако появление в 2019 г. заметного количества землетрясений с гипоцентрами глубже 2 км (до 9,4 км) и отмеченные через 4 месяца после этого изменения в составе газа не исключают и более глубинную составляющую этих активизаций и требуют более детальных (количество исследуемых фумарол и компонентов газа) и расширенных (в части методов) исследований.

Список литературы

1. Малик Н.А. Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) / Н.А. Малик, М.Е. Зеленский, В.М. Округин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. №1(33). С. 21–33. URL: <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/issue/view/12> (Дата обращения 2.08.2021)
2. Малик Н.А. Комплексные исследования активности Авачинского вулкана в 2013–начале 2020 гг.: наземные, видео и сейсмические наблюдения / Н.А. Малик, М.Ю. Некрасова // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. №2(46). С. 41–54. DOI: 10.31431 / 1816-5524-2020-2-46-41-54 URL: <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/view/618> (Дата обращения 2.08.2021)
3. Мельников Д.В. Оценка эмиссии диоксида серы вулканами Камчатки (по данным дистанционных измерений) / Д.В. Мельников, С.В. Ушаков // Доклады Четвертой научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 30 сентября – 4 октября 2013 г. г. Петропавловск-Камчатский., 2013. http://www.emsd.ru/conf2013lib/rpdf/1monitoring/Melnikov_Ushakov.pdf
4. Таран Ю.А. Изотопный состав и происхождение воды в андезитовых магмах / Ю.А. Таран, Б.Г. Покровский, Ю.М. Дубик // ДАН. 1989. Т. 304. № 2. С. 440–443.
5. Aiuppa A. A model of degassing for Stromboli volcano / A. Aiuppa, A. Bertagnini, N. Métrich et al. / Earth and Planetary Science Letters. 2010. V.295. pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.03.040.
6. Gerlach T.M. Volcanic sources of tropospheric ozone-depleting trace gases // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2004. V. 5. №9. pp. 1–16. DOI: 10.1029/2004GC000747
7. Inguaggiato S. Monitoring active volcanoes: The geochemical approach / S. Inguaggiato, A. Mazot, T. Ohba // Annals of Geophysics. 2011. V. 54. № 2. pp. 115–119. doi: 10.4401 / ag-5187

8. *Taran Y.A.* Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes, Kamchatka, from 1993 to 1994 / *Y.A. Taran, C.B. Cornor, V.N. Shaparetal* // Bulletin of Volcanology. 1997. V.58. № 8. pp. 441–448.

9. *Viccaro M.* Magma storage, ascent and recharge history prior to the 1991 eruption at Avachinsky Volcano, Kamchatka, Russia: Inferences on the plumbing system geometry / *M. Viccaro, M. Giuffrida, E. Nicotra, A.Yu. Ozerov* / Lithos. 2012. V.140–141. pp. 11–24. DOI: 10.1016/j.lithos.2012.01.019

УДК 550.4

Magmatic fracking Avachinsky volcano cone in 2001–2020

Evgenia Chernykh

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

Frac-Digger program (Kiryukhin et al. 2016, Kiryukhin et al. 2017), plane-oriented clusters (POC) were calculated based on the data of the earthquake catalogs of the KF FRC EGS RAS (2000 – August 2021). The data used in the work were obtained with large-scale research facilities «Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>). The geomechanical features of the spatial distribution of these POC were also revealed, and the volume of magma injection for the observed period was estimated.

Keywords: plane-oriented cluster, micro-seismicity, Frac-Digger, magma injections, volcano

Магматический фразинг под Авачинским вулканом в период с 2000 по август 2021 гг.

Е.В. Черных

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

При помощи программы Frac-Digger (Кирюхин и др. 2016, Кирюхин и др. 2017) вычислены плоско-ориентированные кластеры (ПОК) землетрясений по данным каталогов землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН (2000 – август 2021 гг.), полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>). Также выявлены геомеханические особенности пространственного распределения этих ПОК и оценен объем инъекции магмы за наблюдаемый период.

Ключевые слова: плоско-ориентированные кластеры, Frac-Digger, микросейсмичность, магматическая инъекция, вулкан

Вулканы, расположенные недалеко от крупных городов, представляют серьезную потенциальную опасность, как для населения, так и для инфраструктуры. Чтобы предотвратить и уменьшить гуманитарные катастрофы, эти вулканы должны подробно изучаться разными научными методами и тем самым обнаруживать любые признаки их активации. В публикации описываются многолетние сейсмические наблюдения за Авачинским вулканом. Этот вулкан представляет реальную опасность, так как находится в непосредственной близости ~30 км от городов Петропавловска-Камчатского и Елизово. Вулкан Авачинский образовался в плейстоцене и в основном проявлял взрывные или эффузивно-эксплозивные извержения. В настоящее время его форма соответствует типу

Сомма – Везувий. Основание вулкана образовано подковообразной Соммой диаметром ~4 км, имеющей открытую часть ЮЗ направления (Рис. 1) (Кулаков и др., 2014).

Для Авачинского вулкана на сегодняшний день накоплены многолетние сейсмические наблюдения, осуществляемые КФ ФИЦ ЕГС РАН (Чебров и др. 2013). Микросейсмичность этого объекта контролируется 4-мя радиотелеметрическими сейсмическими станциями. За период наблюдений по сейсмическим событиям в районе вулкана с 2000 г. по настоящее время произошло 3901 землетрясений с разными энергетическими классами K_s от 1,2 до 9.

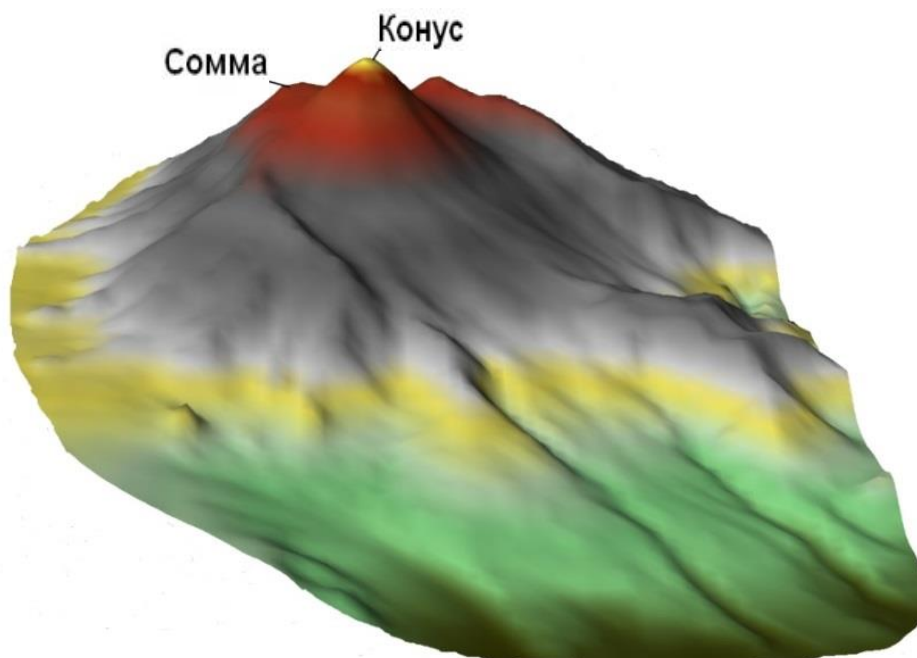


Рисунок 1 – 3D вид Авачинского вулкана

Методом выделения ПОК разработанным А.В. Кирюхиным и др. 2016, 2017 гг. (Кирюхин, 2020) при помощи программы FracDigger (№ 2016616880) можно выделить несколько активизаций Авачинского вулкана. Эта программа выделяет ПОК произошедшие в данном районе. Критериями выборки плоскостей являются следующие параметры:

- 1 – ограничение событий по времени (не менее суток);
- 2 – разброс гипоцентров землетрясений в горизонтальной плоскости должен находиться на расстоянии не более 6-ти км;
- 3 – удаление от плоскости самой площадки на расстояние не более 200 м;
- 4 – количество сейсмических событий в кластере должно быть не менее 6-ти.

За период наблюдений с 2000 г. и по настоящее время можно выделить 6 сейсмических активизаций Авачинского вулкана см. таблицу 1.

Таблица 1. Активизации Авачинского вулкана в период с 2000 г по август 2021 г. и характеристики ПОК вулканических землетрясений

№	Дата	Угол падения	Азимут падения	X	Y	Z	K_s max	n	
2	17.10.2001	48.8	357.1	488711	5900985	2077	3.3	9	октябрь 2001 г
3	19.10.2001	89.9	90.1	488726	5900874	1826	5.8	8	
36	26.03.2008	74.9	263.7	489038	5901077	1095	4.8	6	март – апрель – май 2008 г
37	29.03.2008	81.2	24.3	489049	5901040	558	3.3	6	
38	06.04.2008	76.7	286.8	488876	5900985	873	4	8	
39	07.04.2008	66.3	327.7	488822	5900985	879	3.6	9	
40	08.04.2008	80.5	64.6	488852	5901165	744	4.2	8	
41	24.05.2008	80.6	238.6	488960	5901170	1340	3.3	6	

№	Дата	Угол падения	Азимут падения	X	Y	Z	Ks max	n	
181	09.04.2011	41.1	283.7	489374	5901286	1433	4.5	6	апрель – май 2011 г
182	09.04.2011	58	249.5	489343	5900974	1454	4.1	12	
183	10.04.2011	3.5	125.6	489493	5900799	1732	4.2	14	
184	11.04.2011	72.4	33.8	489232	5901050	1573	4	6	
185	15.04.2011	68.3	13.4	489262	5900806	1172	4.7	6	
186	19.04.2011	78.8	159.3	489617	5900881	1458	4	6	
187	20.04.2011	56.1	359.9	490134	5901043	1638	3.1	6	
188	21.04.2011	31.2	45	489407	5901256	1583	3.7	6	
189	26.04.2011	7	114.2	489231	5900904	1769	3.3	8	
190	26.04.2011	70.2	310.1	489016	5900891	1795	4.3	8	
191	28.04.2011	63.5	339.2	489231	5900945	1525	3.2	6	
192	29.04.2011	55.4	36.6	489135	5900999	1718	3.1	6	
193	30.04.2011	72.3	196.6	489274	5900760	1635	4.1	8	
194	30.04.2011	77.4	26.5	489265	5900849	1574	4.1	9	
195	01.05.2011	59.1	79.3	489373	5900838	1722	2.8	10	
196	01.05.2011	77.2	6.1	489257	5900843	1558	2.8	6	
197	02.05.2011	18.2	133.9	489273	5900821	1800	3.8	10	
198	03.05.2011	51.8	14.5	489297	5900833	1755	5.1	13	
199	04.05.2011	9.6	111.2	489569	5900874	1730	4.3	6	
201	01.02.2012	83.4	79.3	489535	5901086	907	3.6	7	февраль 2012 г
202	01.02.2012	58.2	24.6	489452	5900909	1075	4.3	6	
203	02.02.2012	64.2	222.8	489025	5901340	1173	3.4	7	
204	03.02.2012	21.3	151.3	488403	5901329	1731	4.9	7	
220	29.10.2019	1.6	110.5	489188	5900238	1842	4.2	6	октябрь – ноябрь – декабрь 2019 г (Фирстов и др. 2021)
221	31.10.2019	66.6	262	489265	5900604	1512	4.9	14	
222	04.11.2019	81.4	72.9	489516	5900534	1647	3.5	6	
223	04.11.2019	57.9	288.2	489328	5900775	1292	4.5	7	
224	06.11.2019	82.7	242.5	489291	5900574	1407	4.5	6	
225	06.11.2019	81.7	69.3	489262	5900434	811	5.5	7	
226	12.11.2019	73.6	257.9	489179	5900771	1635	5.3	6	
227	17.11.2019	10.9	20	489197	5901039	1814	3.9	14	
228	18.11.2019	83.9	104.9	488983	5900870	774	3.6	10	
229	08.12.2019	65.6	246.1	489145	5900960	997	3.4	8	
230	09.12.2019	81.6	251.8	489154	5900904	302	6.6	6	
231	10.12.2019	6	221.8	489353	5900858	1813	4.4	11	
232	21.12.2019	71.9	239.3	488828	5901139	1332	3.9	7	
233	22.12.2019	59.4	348.1	489092	5900708	503	2.9	6	
234	22.12.2019	59.9	203.5	489338	5900679	1039	3.1	6	
237	09.01.2021	58.6	259.9	489310	5900882	1565	3.1	6	январь – февраль 2021 г
239	14.01.2021	76.3	262.6	489225	5900821	1161	3.3	6	
240	18.01.2021	72.3	252	489162	5901002	1616	2.7	9	
241	18.01.2021	80.3	71.4	489116	5900760	1363	3.6	6	
242	05.02.2021	56.6	83.1	489068	5901069	1286	4.4	6	

Примечание: X, Y, Z – координаты центров кластеров, Ksmax – максимальный энергетический класс в кластере, n – число землетрясений в кластере.

Для визуализации пространственного распределения ПОК было использовано ПО PetraSim (Рис. 2).

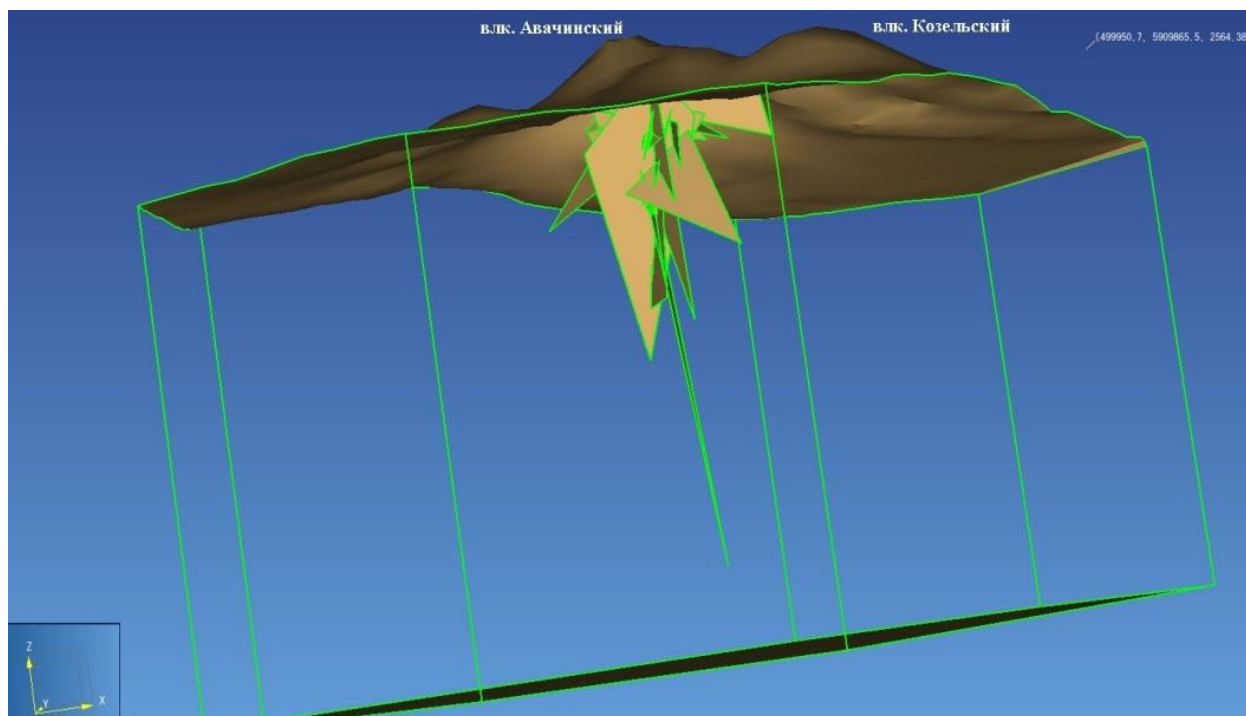


Рисунок 2 – 3D визуализация плоско-ориентированных кластеров землетрясений в период с 2000 по август 2021 гг.

Анализ сейсмической активности вулкана Авачинского выявил следующие геомеханические особенности:

- основная глубина центров залегания ПОК находится в конусе вулкана на высоте от 300 до 2000 м в.у.м.;
- большая часть ПОК $\approx 91\%$ простирается в субмеридиональном направлении с углами падения от 31° до 89° на площади $49,9 \text{ км}^2$;
- остальные 9% ПОК располагаются в субширотном направлении с углами падения от $1,6^\circ$ до $9,6^\circ$ на площади $3,4 \text{ км}^2$;
- магнитуды сейсмических событий при внедрении ПОК были от 0,6 до 2,55.

Общий объем инжекции магмы за 6 активизаций в период с 2000 по август 2021 можно оценить в размере $\approx 235\,000 \text{ м}^3$ (по формуле предложенной (Fujii et al., 2017) $M = 0,67 \times \log(V) - 0,82$ (где M – максимальная магнитуда индуцированного сейсмического события).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ_a «Магматический фрактинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА–А20–120121090010–7.

Список литературы

1. Кирюхин А.В. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. / А.В.Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С.3–20.
2. Кирюхин А. В. Магматические питающие системы Корякско–Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников / А. В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин, Е.В. Черных // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.

3. Чебров В.Н. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. / В.Н. Чебров, Д.В. Дроздин, Ю.А. Кугаенко и др. // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 18–40.

4. Фирстов П.П. Активизация Авачинского вулкана в 2019 г. / П.П. Фирстов, А.А. Шакирова, А.П. Максимов, Е.В. Черных // Вулканология и сейсмология. 2021. №3. С. 1–15
DOI: 10.31857/S0203030621030032.

5. Kulakov Ivan Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding. / Ivan Kulakov, Kayrly Jaxybulatov, Nikolay M. Shapiro et al. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. № 285. P.36–46.

6. Fujii Y. Upper Bounds of Seismic Events in Induced Seismicity by Shale Gas Extraction, Carbon Capture and Storage, and Natural Magma Injection / Y. Fujii, J. Kodama, D. Fukuda // Journal of Volcanology and Seismology. 2017. № 6. 25 p.

7. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с.
URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

CHAPTER V. MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER, GEOMECHANICAL PROCESSES AND CHEMICAL INTERACTION IN GEOFLUIDIC SYSTEMS

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

УДК 551.21

Thermal Model of Avacha Volcano

Vadim Gordienko

*Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
GordienkoVadim39@gmail.com*

First, the temperature distribution (T) in the crust and upper mantle under the East Kamchatka volcanic belt was plotted, which corresponds to the advection-polymorphic hypothesis. The control was carried out using geothermometers of the belt region and a velocity section. Zones of partial melting were revealed in the subcrustal mantle and at depths of 20–30 km. Volcanoes arise over areas of secondary advection, which move partially molten material to a depth of 5–7 km. Above, in the periods between eruptions, heat is transferred by fluids. The column of hypocenters along the fumaroles extends up to 4 km. The results of calculating T in this object are consistent with the data of geothermometers. In the calculation, it was assumed that convection also occurs in the channel below the zone of circulation of hydrothermal fluids. Information on the viscosity of the channel filling and the permeability of the medium is unknown, but in our case it does not matter much: the vertical temperature gradient clearly exceeds the adiabatic one, and the T difference between the top and bottom is small.

Keywords: deep-seated process, thermal model of a volcano, geothermometers

Тепловая модель вулкана Авача

В.В. Гордиенко

Институт геофизики Национальной Академии Наук Украины, Киев, Украина

Вначале построено распределение температуры (T) в коре и верхах мантии под Восточно-Камчатским вулканическим поясом, отвечающее адвекционно-полиморфной гипотезе. Контроль проведен по геотермометрам района пояса и скоростному разрезу. Выявлены зоны частичного плавления в подкоровой мантии и на глубинах 20–30 км. Вулканы возникают над участками вторичной адвекции, перемещающей частично расплавленный материал на глубины 5–7 км. Выше в периоды между извержениями тепло переносится флюидами. Столб гипоцентров вдоль fumarol, протягивается до 4 км. Результаты расчета T в этом объекте согласуются с данными геотермометров. При расчете предполагалось, что конвекция происходит и в канале ниже зоны циркуляции гидротерм. Информация о вязкости заполнения канала и проницаемости среды неизвестна, но в нашем случае это не имеет большого значения: вертикальный градиент температуры явно превышает адиабатический, перепад T между кровлей и подошвой невелик.

Ключевые слова: глубинный процесс, тепловая модель вулкана, геотермометры

Региональная модель

По адвекционно-полиморфной гипотезе (АПГ) региону Восточно-Камчатского вулканического пояса отвечает определенный вариант тепломассопереноса в верхней мантии

и коре (Gordienko et al., 2020). Последний акт этого процесса (современная активизация) начался первые миллионы лет назад и продолжается до настоящего времени.

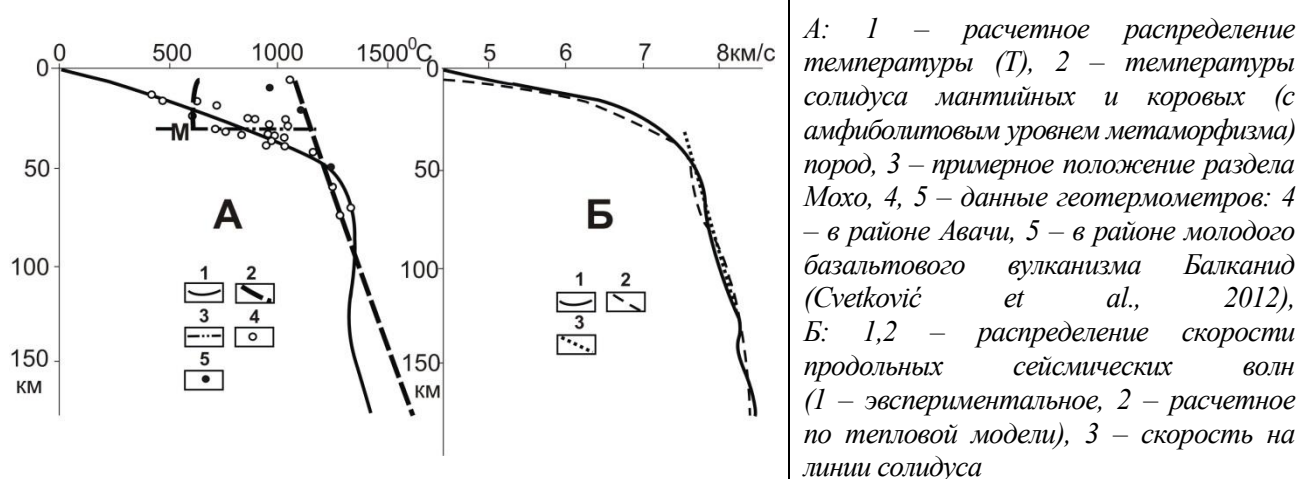


Рисунок 1 – Тепловая (А) и скоростная (Б) модели коры и верхней мантии Восточно-Камчатского вулканического пояса в районе Авачи

Построенная на такой основе тепловая модель сопоставлена с данными геотермометров (Рис. 1). Речь идет о разных объектах: ксенолитах из пород над магматическими очагами, параметрах самих очагов, температурах и глубинах кристаллизации внедрившейся магмы. Рассмотрены данные не только для района Авачи, но и Ключевского вулкана, Шивелуча, Харчинского, Бакенинга и др.. Очевидно, что информация о PT -условиях образования ксенолитов, выносимых магмами, отражает разные периоды предшествующего охлаждения пород. Разница между ними превосходит вариации, объяснимые погрешностями. Поэтому с расчетной температурной кривой в коре сопоставлены сведения именно по району Авачи. Информация о PT -условиях в очагах базитов (в том числе – авачитов) и андезитов-базальтов, напротив, практически универсальна. Важна лишь уверенность в сохранении выявленных PT -параметров до настоящего времени. Наличие действующего вулкана дает такую гарантию. Из согласования с тепловой моделью района выпадают наиболее высокие температуры на сравнительно небольших глубинах (Рис. 1). Они представлены и данными по другому вулкану (Cvetković et al., 2012) и состоят из ксенолитов из затвердевшей магмы прошлых извержений, находившейся в магматическом канале.

Соответствие тепловой модели геотермометрам достаточно полное (учитывая погрешность определения PT -параметров). Ошибки PT -условий можно оценить в $50\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 10 км (Гордиенко, 2014). Построенная модель, в сущности, заметно не отличается от приведенной в (Gordienko et al., 2020), но содержит коровый этаж. Выделяется слой частичного плавления в мантии в интервале глубин около 50–100 км и в коре – на 20–30 км. Вторжения в верхнюю часть коры как мантийных магм, так и (в основном) контаминированных влиянием подплавленных коровых пород, неизбежно. Это подтверждает не только собственно вулканизм, но и распределение данных геотермометров (Рис. 1), обнаруживающих высокие T на небольших глубинах. Вместе с данными по изучаемому району приведены для сравнения результаты определения PT -условий кристаллизации базанитовой магмы в зоне молодого магматизма Балканид Сербии (Cvetković et al., 2012). Они неплохо согласуются с полученными для Авачи. Следует отметить, что эти сведения не описывают температуру сколько-нибудь значительного объема пород. Это температура продуктов одного из вбросов материала непосредственно в очаг под вулканом или собственно лавы: согласно (Vissaro, 2012) она составляет около $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. По данным этих авторов в период извержения такая температура – на кровле верхнекорового очага ($3,5\pm 2$ км от поверхности вулкана).

Построенный скоростной разрез дуги согласуется в верхней части со средним распределением V_p в Восточной Камчатке (Gordienko et al., 2020) (Рис. 1Б). Среднее

различие составляет только $\pm 0,04$ км/с, что свидетельствует о практическом совпадении моделей и высокой точности обеих независимо полученных результатов.

Локальная модель

По данным о структуре коры под вулканами Камчатки (прежде всего – о распределении скоростей сейсмических волн) можно составить довольно полное представление о тепломассопереносе в коре под вулканами. Оно полностью согласуется с принятой схемой глубинного процесса, в том числе – в определении преобладающих глубин верхних и нижних очагов частичного плавления и степени заполнения пространства вторгшимися магмами на разных глубинах (до 20–25 % на нижнем уровне и 10 % – на верхнем) (Kiryukhin et al., 2015). Оценены также площади сечений каналов, по которым переносится основное количество вещества в верхнюю кору: их диаметры – порядка первых км. Таким образом, существует возможность для расчета.

Тем не менее, для подробного воспроизведения процесса такой информации недостаточно. Прежде всего, отсутствуют сведения о степени заполнения магмой каналов указанного размера. Но едва ли для построения модели приемлемой достоверности нужно рассматривать эффекты тепломассопереноса при каждом извержении. Оно может характеризоваться неизвестными особенностями, приводящими к образованию после каждого такого события и прекращения подпитки магмой ее раскристаллизованных порций, создающих на разных глубинах препятствия для продолжения этого этапа процесса. Выше тепло переносится флюидами. Если построить тепловую модель их циркуляции между поверхностью и застывающей верхушкой интрузии, то общий контур коровой модели можно представить в виде перехода от температуры нижнекорового слоя расплава к подошве слоя конвектирующих флюидов.

Дополнительные ограничения модели дают сведения о фумаролах Авачи. Определены T газов в 25 фумаролах, значения распределяются в диапазоне 100–620 °С, т.е. до самой верхней кромки магматической камеры (Малик и др., 2017). Во всем этом интервале глубин под вулканом распространены микроземлетрясения (Рис. 2), четко маркирующие глубину зоны циркуляции и сечение канала (несколько километров). Расчет T можно выполнить с полной определенностью и проконтролировать его результаты по данным на термальном поле Какконда с аналогичной глубиной очага, питающего поток флюидов.

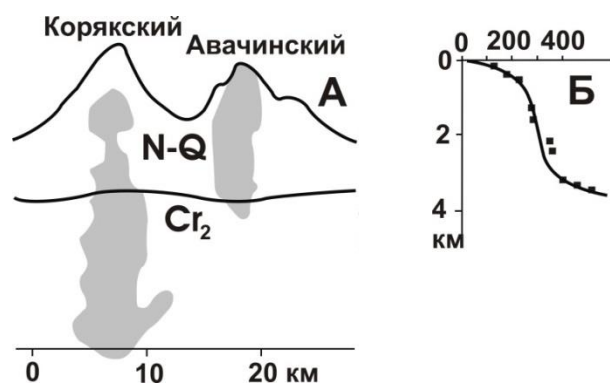


Рисунок 2 – Распределение гипоцентров микроземлетрясений под вулканами (Kiryukhin et al., 2015) и распределение T в широкой зоне циркуляции с глубиной подошвы 3,5–4,0 км (линия – расчетные значения, точки – результаты измерений в скважинах и данные геотермометров термального поля Какконда в Японии (Tatayui et al., 2005)

Таким образом, распределение температуры под Авачей в верхней части разреза (в пористой проницаемой тефре) устанавливается надежно. Незначительное количество фумарольных проявлений (они не создают заметного столба микроземлетрясений) выносит газ с T около 800 °С. Они явно питаются материалом нижнекорового очага (глубиной около 25 км). Выше было отмечено и проявление верхнемантийного резервуара магмы.

Согласование расчетных и экспериментальных результатов вполне приемлемое. Распределение коровых T ниже зоны гидротермальной циркуляции Авачи можно представить на основании (Иванов, и др., 2008). T солидуса около 700 °С в нижней части верхнего очага, возможно, больше других подходит для пород состава голоценовых извержений вулкана (андезиты и андезитобазальты), чем использованное выше, характерное

для гранитов. Последние по возрасту лавы были андезитовыми и выносили обломки того же состава. Поэтому в современном заполнении канала между нижнекоровым резервуаром и камерой непосредственно под вулканом температуры должны быть на уровне 700–800 °С.

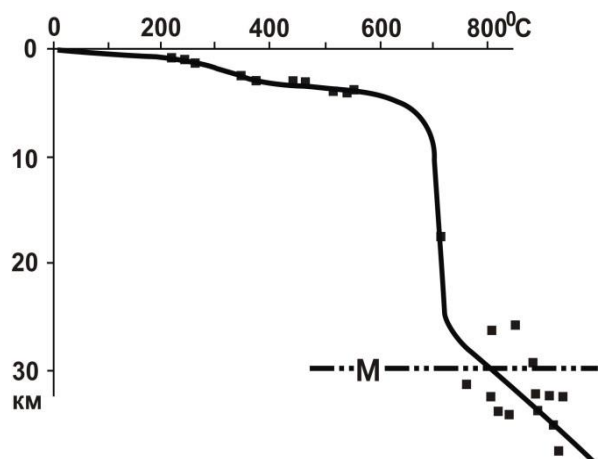


Рисунок 3 – Тепловая модель коры для канала поступления магмы и зоны циркуляции термальных вод под Авачей на фоне модели за пределами этих элементов (Рис. 1). Линии – расчетные T , точки – данные геотермометров

В пределах канала шириной в несколько км такая температурная аномалия сохраняется тысячелетия. Нагрев соседних блоков заметен только на очень незначительных расстояниях. Разница между T в нижней и верхней частью канала невелика, поэтому вероятно его заполнение при извержении, близкое к полному. И при частичном заполнении известная периодичность прохождения магмы по каналу делает значительные снижения температуры в нем маловероятными. Тепловая модель может быть несколько отличной в нижней коре от описанной под вулканами с преобладанием голоценового базальтового магматизма (т.е. преимущественно – севернее Авачи). Распределение температуры в коре непосредственно под вулканом Авача представлено на рис. 3.

Естественно, в нем отсутствуют данные геотермометров в коре вблизи линии солидуса мантийных пород (т.е. момента извержения) и показанные на рис. 1 на глубинах менее 25 км (вне вулкана).

При расчете предполагалось, что конвекция происходит и в канале ниже зоны циркуляции гидротерм. Информация о вязкости заполнения канала и проницаемости среды неизвестна, но в нашем случае это не имеет большого значения: вертикальный градиент температуры явно превышает адиабатический, перепад T между кровлей и подошвой невелик. Принятая форма кривой повторяет использованную выше для верхней части разреза. Полученная линия вполне согласуется с распределением T в верхних горизонтах мантии. Т.е. при незначительном упрощении тепловую модель можно описать как рост температуры от поверхностной до солидуса пород амфиболитовой фации на глубине подошвы гидротермальной конвекции и продолжение до T на разделе Мохо в области современной активизации под Восточным вулканическим поясом Камчатки в целом. Расхождения расчетных и экспериментальных T в интервале глубин 0–70 км составляют в среднем 70 °С, что не превышает обусловленных погрешностями.

Список литературы

1. Гордиенко В.В. О РТ-условиях магматических очагов в мантии Земли. / В.В. Гордиенко // Геофизический журнал. 2014. № 6. С. 28–57.
2. Иванов Б.В. Андезиты Камчатки (Справочник химических анализов вулканитов и основных породообразующих минералов). / Б. В. Иванов; ред.: А.В. Колосков. М.: Наука, 2008. 364 с.
3. Малик Н.А. Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) / Н. А. Малик, М. Е. Зеленский, В. М. Округин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. №1(33). С. 21–33. URL: <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/issue/view/12>.
4. Cvetković V. Cognate clinopyroxene from Paleogene mantle xenolith-bearing basanite lavas (East Serbia, SE Europe): the role of dissolution of mantle orthopyroxene / V. Cvetković, S. Erić., M. Radivojević, K. Šarić // Mineralogy and Petrology. 2012, V. 106, № 3–4, pp. 131–150.

5. Gordienko V. Deep processes, velocity, heat and density models of the Eastern Kamchatka upper mantle / V. Gordienko, L. Gontovaya, I. Nizkous // Геофиз. журнал. 2020. № 1. С. 34–50.

6. Kiryukhin A. Geofluids of Avachinsky-Koryaksky Volcanogenic Basin, Kamchatka, Russia. / A. Kiryukhi, Y. Manukhin, S. Fedotov, V. Lavrushin, T. Rychkova, G. Ryabinin, A. Polyako, P. Voronin // Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne. 2015. 11p.

7. Tamanyu S. Hydrothermal and Heat Source Model for the Kakkonda Geothermal Field, Japan. / S. Tamanyu, K. Fujimoto // Proceedings World Geothermal Congress. Antalya, 2005, pp. 24–29.

8. Viccaro M. Magma storage, ascent and recharge history prior to the 1991 eruption at Avachinsky Volcano, Kamchatka, Russia: Inferences on the plumbing system geometry / M. Viccaro, M. Giuffrida, E. Nicotra, A. Ozerov // Lithos. 2012. 140–141, pp. 11–24.

УДК 551.21

Thermal Models of Ore Zones

Vadim Gordienko¹, Ivan Gordienko²

*Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
GordienkoVadim39@gmail.com*

Thermal water circulation is modeled for Ukrainian deposits. The flow rose from a depth of 6–7 km above the top of the intrusion along a permeable zone of deep fault the first hundred meters wide. The circulation rate corresponded to the permeability, which was 3 orders of magnitude higher than that due to the known porosity. It was assumed that this increase is associated with local seismicity. Thermal models for different age of deposits differ only in surface temperature (T). The calculated values are compared with geothermometer data. Average deviations of T from the calculated ones are about 40 °C, which is comparable to the errors of geothermometers. The estimated duration of the deposit formation reaches 50–100 thousand years.

Keywords: hydrothermal deposits, heat flow anomalies, thermal models, geothermometers

Тепловые модели рудных зон

В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко

Институт геофизики Национальной Академии Наук Украины, Киев, Украина

Для месторождений Украины моделируется циркуляция термальных вод. Поток поднимался с глубины 6–7 км над кровлей интрузии по проницаемой зоне глубокого разлома шириной первых сотен метров. Скорость циркуляции соответствовала проницаемости, которая была на 3 порядка выше, чем обусловленная известной пористостью. Предполагалось, что этот рост связан с местной сейсмичностью. Тепловые модели для разного возраста залежей различаются только температурой поверхности (T). Рассчитанные значения сравниваются с данными геотермометров. Средние отклонения T от расчетных составляют около 40 °C, что сопоставимо с погрешностями геотермометров. Предполагаемая продолжительность формирования месторождения достигает 50–100 тысяч лет.

Ключевые слова: гидротермальные месторождения, аномалии теплового потока, тепловые модели, геотермометры

Введение

С золото-сульфидными рудами связано более 40% мировых запасов Au (Кузьмин и др., 1999), оно присутствует преимущественно в тонкодисперсной форме в сульфидах. В этом смысле руды не отличаются от руд магматической сульфидной Co-Ni-Cu формации.

Рудопроявления и месторождения этого типа встречаются в различных регионах Украины, они представлены результатами гидротермального процесса. Минерализация, как правило, сопровождается крутопадающие разломы, образующие трещиноватые зоны. В Закарпатье – в слаболитифицированных первично вулканогенно-осадочных толщах. В Донбассе степень литогенеза вмещающих пород значительно выше. На Украинском щите (УЩ) она достигает зеленосланцевой или амфиболитовой фаций.

Анализ принадлежности месторождений к типам эндогенных режимов (по адвекционно-полиморфной гипотезе – АПГ (Гордиенко, 2017)) показал, что в фанерозое они формировались на стадии постгеосинклиальной активизации и сопровождалась накоплением хлоридов в осадках. Есть признаки сходных процессов и в докембрии.

Оценки расхода энергии на образование среднего месторождения рассматриваемого типа приводят к величинам около 10^{12} Дж. Это значительная величина, но в пересчете на единицы площади и времени она составляет 3 мВт/м^2 , что на порядок меньше синхронной аномалии теплового потока (ТП).

Тепловые аномалии

Реальные аномалии теплового потока, отвечающие процессу на Украине, можно обнаружить в Закарпатском прогибе, в Донбассе, на Украинском щите (УЩ) (Рис. 1).

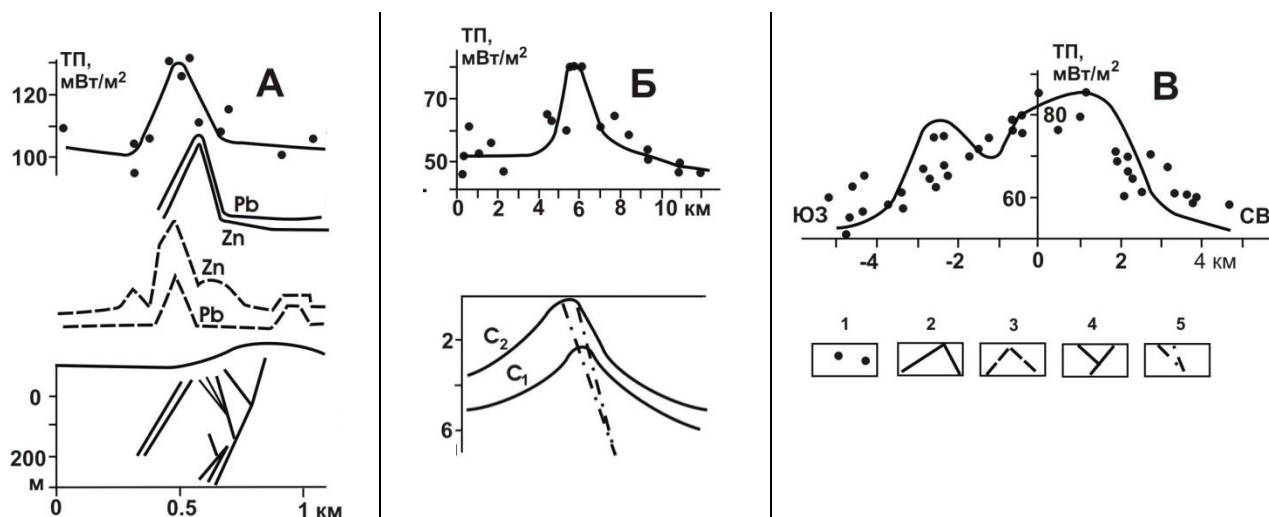


Рисунок 1 – Распределение теплового потока на месторождениях в Закарпатском прогибе (А), на Главной антиклинали Донбасса (Б) и на Никитовском рудном поле Донбасса (В)

1 – тепловой поток (точки – экспериментальный, линии – расчетный), 2, 3 – данные металлотрии (2 – в почве, 3 – в тепле растений), 4 – рудные зоны, 5 – Осевого разлом Главной антиклинали Донбасса

Аномалии ТП во многих зонах современной активизации Украины имеют то же превышение над фоном (около $25 - 35 \text{ мВт/м}^2$), но за пределами Карпат с ними не связаны рудные месторождения. Это относится и к возмущениям ТП на киммерийских месторождениях Главной антиклинали (Рис. 1) и Нагольного кряжа Донбасса, месторождениям докембрийского возраста на Украинском щите. Интересна ситуация на Никитовском рудном поле. Здесь известны восемь месторождений киновари (с заметным содержанием золота), сгруппированных на трех участках в центральной части антиклинали и на ее крыльях. Современное распределение теплового потока (Рис. 1) можно примерно объяснить, разместив на этих участках аномалии, рассчитанные для современной циркуляционной системы на Главной антиклинали.

Таким образом, можно допустить, что разновозрастные активизации используют те же проницаемые зоны для подъема флюидов. Но только постгеосинклиальные создают реальные скопления руд. Хотя небольшие отложения сульфидов, часто со следами золота, присутствуют в зонах перечисленных выше активизаций, происходящих вне постгеосинклиального этапа. А в молодых рудных районах, например, в Закарпатском прогибе, присутствуют небольшие месторождения углеводородов, распространенные в зонах

современной активизации прогибов с возрастом фундамента от докембрийского до герцинского. Для возникших в эти почти безрудные периоды флюидов характерны существенно меньшие концентрации хлоридов, появляются заметные количества фтора.

Интерпретация аномалий

Интерпретация аномалий теплового потока, отвечающих районам интенсивной циркуляции флюидов (Рис. 1), проведена в виде поиска параметров конвективной ячейки, эффект которой, будучи добавленным к нормальному для региона ТП (на момент зарождения ячейки), позволил бы объяснить наблюдаемое распределение. Толщина конвектирующего слоя – расстояние между поверхностью Земли и кровлей интрузии – принята равной 7 км. Более подробно использованная схема теплопереноса описана в (Александров и др., 1996). Для объяснения аномалии оказалась необходимой узкая ячейка (шириной в первые сотни метров) с очень большим числом Нуссельта, подразумевающим необычайно высокую проницаемость пород слоя – около $5 \times 10^{-13} \text{ м}^2$, время стабилизации теплового поля – десятки тыс. лет. Для киммерийской активизации в Донбассе расчет был несколько усложнен наличием в верхней части разреза практически непроницаемой толщи глин перми мощностью около 2 км.

Аналогичные расчеты проведены в работе (Vächler et al., 2002) для одного из разломов Рейнского грабена. Они привели к практически тем же параметрам гидротермальной системы (ширина проницаемой зоны – 200 м, глубина подошвы – 5,5 км, проницаемость разломной зоны – $5 \times 10^{-13} \text{ м}^2$, время стабилизации теплового поля – 77 тыс. лет). Во всех случаях удается объяснить аномалии теплового потока интенсивностью до 20 – 40 мВт/м² на обычной глубине наблюдения (500 – 1000 м).

Проницаемость пород Главной антиклинали Донбасса, лабораторно определенная при нормальных условиях, отвечает их небольшой пористости, составляющей около 1 % в самой верхней части разреза и сокращающейся до 0,5 % и менее в остальной толще осадочных пород (Александров и др., 1996).

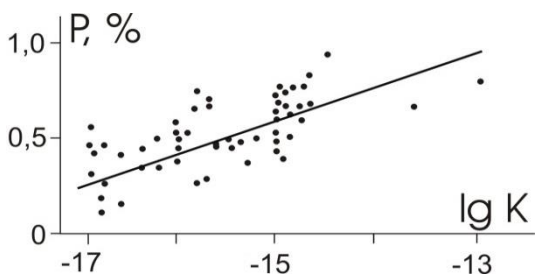


Рисунок 2 – Связь проницаемости (K) с пористостью (P) пород по (Шарапов, 1992)

Для получения нужной величины K необходимо увеличить ожидаемую по пористости примерно на 2 – 3 порядка. Рассмотрение влияния роста с глубиной температуры и давления на проницаемость не позволяет ожидать такого эффекта (Витовтова и др., 1982 и др.). Эта особенность перколяционного увеличения проницаемости прослеживается во всех задачах такого рода, связанных с гидротермами в активизированных районах. Физической основой перколяции является местная сейсмичность,

присущая активизированным зонам (Галимов, 1973 и др.).

Существует и точка зрения, согласно которой рост проницаемости связан с периодическим кратковременным увеличением пористости, которое обусловлено повторными инъекциями высоконапорного магматического материала из глубинного очага в приповерхностный (Fournier, 1999). В промежутках трещины залечиваются.

Тепловые аномалии в рассмотренных случаях одинаковы по интенсивности, хотя мощность трещиноватых зон в Донбассе гораздо больше, чем в Закарпатском прогибе и на щите.

Тепловые модели недр в центральной части ячейки (на оси «термального купола») построены для месторождений, где имеются данные геотермометров, позволяющие контролировать результаты расчетов. Различия между расчетными моделями отчасти связаны с изменением температуры поверхности Земли по сравнению с современной в разные периоды геологической истории. В мезозое Донбасса она была на 20 °С выше нынешней, для времени формирования месторождений Украинского щита (около 2 млрд лет назад) условно считалась превышающей ее на 40 °С. Результаты сравнения показаны на рис. 3.

Очевидно согласование расчетных (базирующихся на схеме глубинного процесса) и экспериментальных данных. Для месторождений разного возраста тепловые модели оказываются очень близкими.

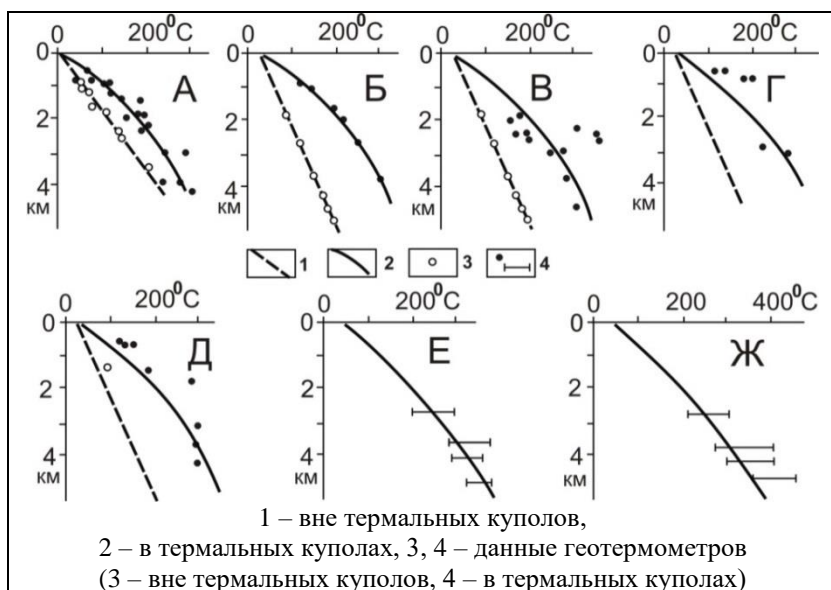


Рисунок 3 – Сравнение расчетных распределений температуры (1, 2) с данными геотермометров по сульфидным месторождениям Закарпатского прогиба (А), Главной антиклинали Донбасса (Александров и др., 1996) (Б), Нагольного кряжа (В), рудопроявлений на периферии Донбасса (Г), Никитовского и Садонского рудных районов (Д), Клинцовского рудного поля (Е) и других месторождений центральной части Украинского щита (Ж)

Сравним данные о распределении по глубине температур образования минералов рудных месторождений со сведениями по обширным бассейнам термальных вод (часто сопряженным с районами современного или недавнего магматизма), приводимыми в различных публикациях (Шарапов, 1992 и др.) (Рис. 4).

Расчетное распределение T для бассейнов термальных вод характеризует ситуацию с почти адиабатическим градиентом в основной части ячейки и ярко выраженной верхней погранзоной. В аналогичной нижней погранзоне температура должна приближаться к солидусу гранита. Очевидно, что речь идет о свободной конвекции до кристаллизации расплава. Логичным представляется считать в данном случае гидродинамическим барьером верхнюю погранзону небольшой мощности. Оценки длительности периода сохранения расплава у кровли интрузии оказываются много меньше времени, необходимого для формирования месторождения. Основная его часть возникает в последующий период, когда температура кровли интрузии ниже солидуса.

Интенсивность теплопереноса в бассейне термальных вод магматического района позволяет объяснить с большой точностью, в частности, колоссальные тепловые потоки, непонятные при использовании модели магматизма в зоне субдукции (Hochstein, 1995 и др.)

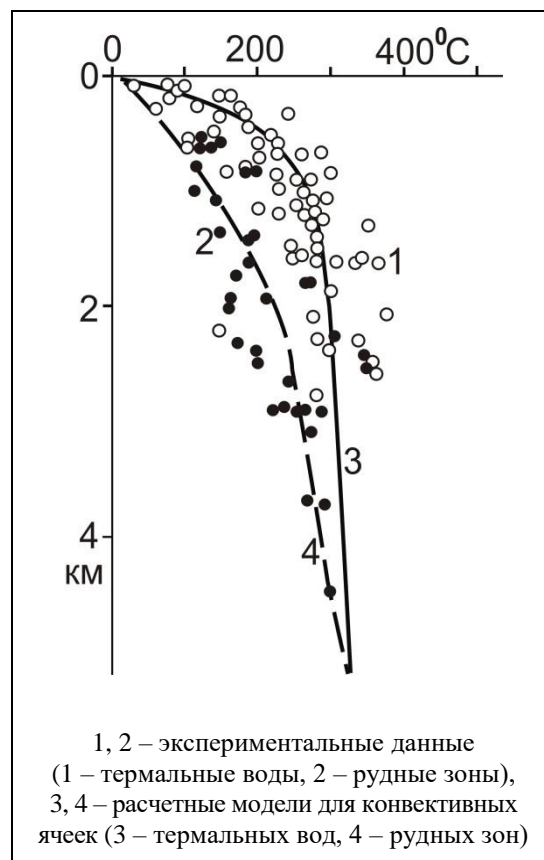


Рисунок 4 – Распределение по глубине температур образования минералов рудных зон и бассейнов термальных вод

Список литературы

1. *Витовтова В.М.* Проницаемость горных пород при давлениях до 2000 кг/см² и температурах до 600 °С. / *В. М. Витовтова, В.М. Шмонов.* // Доклады АН СССР. 1982. Т. 266, № 5. С. 1244–1248.
2. *Галимов Э. М.* Изотопы углерода в нефтегазовой геологии / *Э. М. Галимов; ред. В.Н. Никитина.* М.: Недра., 1973. 384 с.
3. Глубинное строение, эволюция флюидно-магматических систем и перспективы эндогенной золотоносности юго-восточной части Украинского Донбасса / *А. Л. Александров* [и др.]; ред. В. А. Шумлянский. Киев: ИФИ УНА. 1996. 74 с.
4. Минералогические методы поисков и оценки месторождений рудных полезных ископаемых / *В.И. Кузьмин и др.* Москва: ВИМС, 1999. 195 с.
5. *Шарапов В.Н.* Развитие эндогенных флюидных рудообразующих систем / *В.Н. Шарапов; ред. В.Н. Доровский.* Новосибирск: Наука, 1992. 144 с.
6. *Bächler D.* Characteristics of upper crust convective flow in the Rhine graben: application to the Gamma fault at Landau (Germany). The Earth's thermal field and related research methods. / *D. Bächler, T. Kohl, L. Rybach.* Moskow: МГГУ, 2002. P.10–11.
7. *Fournier, R.* Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment / *R. Fournier* // *Economic Geology.* 1999. V. 94. P.1193–1211.
8. *Hochstein M.P.* Crustal heat transfer in the Taupo Volcanic Zone (New Zealand): comparison with other volcanic arcs and explanatory heat source models. / *M.P. Hochstein* // *J. Volc. Geoth. Res.* 1995. V. 68, issues 1–3. pp. 117–151.

УДК 551.2.03:549.6

Phenomena of silicate-carbonate and silicate-silicate immiscibility in fluid-magmatic systems (experiment)

Nataliya Suk, Alexey Kotelnikov

*D.S. Korzhinsky Institute of experimental mineralogy, Russia
sukni@iem.ac.ru*

Experimentally studied silicate-carbonate melts stratification at 1100, 1250 °C and 2 kbar as well as REE, Ba, Sr, Nb, Ta partition character between phases. Melting in the trachyriolite-water system under special conditions mimicking the volcanic process was carried out. Silicate-silicate liquid immiscibility with the formation of droplets in the main mass of the melt was obtained. The nature of separation of elements (La, Nb, Sr, W, Mo, Cr, Fe, Rb, Cs) between phases was studied.

Keywords: melt, silicate-carbonate and silicate-silicate liquid immiscibility, interphase separation of elements

Явления силикатно-карбонатной и силикат-силикатной несмесимости во флюидно-магматических системах (эксперимент)

Н.И. Сук, А.Р. Котельников

*Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН
sukni@iem.ac.ru*

Экспериментально изучено силикатно-карбонатное расслаивание расплавов при 1100, 1250°C и 2 кбар, а также характер разделения REE, Ba, Sr, Nb, Ta между фазами. Проведено плавление в системе трахириолит – вода в специальных условиях, имитирующих вулканический процесс, то есть с понижением T и P . Получена силикат-силикатная жидкостная несмесимость с образованием капель в основной массе расплава. Изучен характер разделения элементов (La, Nb, Sr, W, Mo, Cr, Fe, Rb, Cs) между фазами.

Ключевые слова: расплав, силикатно-карбонатная и силикат-силикатная жидкостная несмесимость, межфазовое разделение элементов

Среди вулканических пород часто встречаются шаровые образования (сферолиты), которым, приписывается ликвационный генезис. Для ряда основных пород это явление изучалось экспериментально, однако для кислых вулканических пород экспериментальные подтверждения существования жидкостной несмесимости отсутствуют, хотя, следует отметить, что шаровые образования в кислых породах достаточно широко развиты. Подобные случаи отмечены для субвулканических пород Западной Камчатки и современных лав вулкана Кизимен (Камчатка). Среди кислых стекол (перлитов) палеогенового возраста Восточных Родоп также широко развиты шаровые образования риолитов и трахириолитов. Описаны морфологические особенности таких шаровых образований. В первую очередь – это существование границ раздела (Ewart, 1971; Yanev, 2003), которые свидетельствуют об их ликвационном генезисе.

Магматические комплексы представляют собой сложные гетерогенные флюидно-магматических системы, представленные как алюмосиликатным расплавом, так и флюидной фазой. Существуют также флюидно-магматические системы, в которых высококонцентрированный солевой расплав, отделяясь от алюмосиликатного расплава, может непосредственно образовывать собственные несиликатные породы – например, карбонатиты. Такое силикатно-карбонатное расслоение расплава описано в щелочно-карбонатитовом комплексе Мушугай-Худук в Южной Монголии. Известно уникальное явление излияния щелочной карбонатитовой лавы влк. Олдоиньо Ленгаи (Oldoinyo Lengai) (Танзания). Возможная роль жидкостной несмесимости при образовании карбонатитов и связанных с ними пород отмечалась многими авторами (Koster van Groos, 1975; Hamilton et al., 1989; Kjarsgaard, Hamilton, 1988 и др.). В данной работе представлены экспериментальные результаты изучения силикатно-карбонатного расслаивания расплавов при 1100, 1250 °C и 2 кбар, а также характера разделения ряда элементов (REE, Ba, Sr, Nb, Ta) между несмешивающимися фазами.

Экспериментальное исследование силикатно-карбонатной жидкостной несмесимости

Методика экспериментов

Опыты проводились при $T = 1100$ и 1250 °C и $P = 2$ кбар в заваренных платиновых ампулах диаметром 3 мм на установке высокого газового давления в течение 6 час. с последующей закалкой. Исследовались сухие системы, исходная шихта для которых готовилась из природных минералов (альбита, диопсида, калиевого полевого шпата, нефелина) в различных соотношениях с добавками щелочного карбоната Na_2CO_3 , или смеси его с кальцитом ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3$). Рудные элементы вводились в систему путем добавления окислов La_2O_3 , CeO_2 , Y_2O_3 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 и карбонатов BaCO_3 и SrCO_3 . Исходная навеска составляла 100 мг и перед опытом высушивалась при $T = 100$ °C в течение 18–20 час.

Составы экспериментальных образцов определяли методом электронно-зондового рентгеноспектрального анализа (ЭЗРСА).

Результаты экспериментов

В силикатно-карбонатных системах получена жидкостная несмесимость между силикатным и карбонатным расплавами, которые могут образовывать капли одного расплава в другом, а также выделяться в виде слоев с четкой фазовой границей между расплавами (Сук, 2001, 2017). Кроме того, наблюдались флюидальные текстуры, которые могут моделировать структурно-текстурные особенности, наблюдаемые в природных карбонатитовых комплексах (Рис. 1).

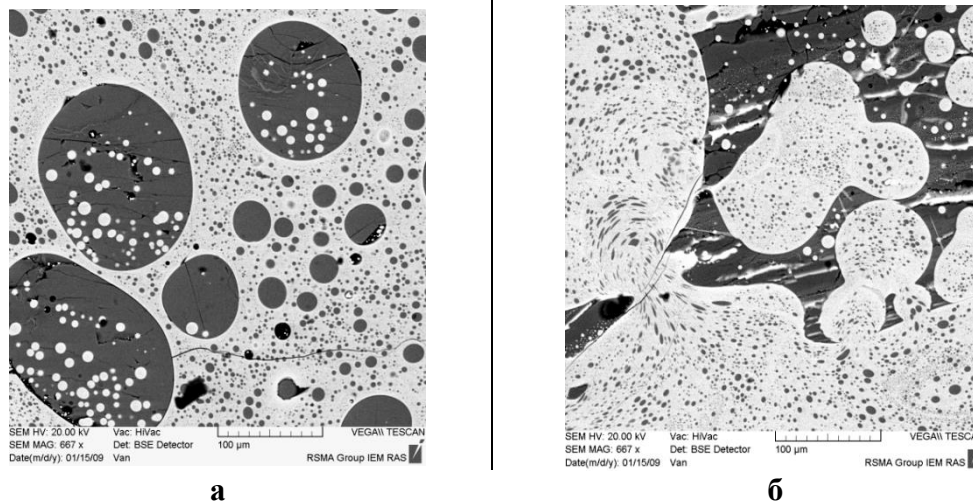


Рисунок 1 – Жидкостное расслоение силикатно-карбонатных расплавов при $T = 1100^{\circ}\text{C}$ и $P = 2$ кбар: а – со структурами «капля в капле», б – с флюидальными текстурами (светлое – силикатный расплав, темное – карбонатный расплав)

При раслаивании щелочных расплавов составы карбонатных фаз в эксперименте при самом высоком коэффициенте агпаитности исходного расплава соответствуют составам карбонатитовых лав Олдоиньо Ленгаи (Oldoinyo Lengai) (Танзания), а составы силикатных фаз сопоставимы с составами силикатных лав и нефелинитов того же вулкана (Dawson, 1989; Dawson et al, 1987) (Рис. 2).

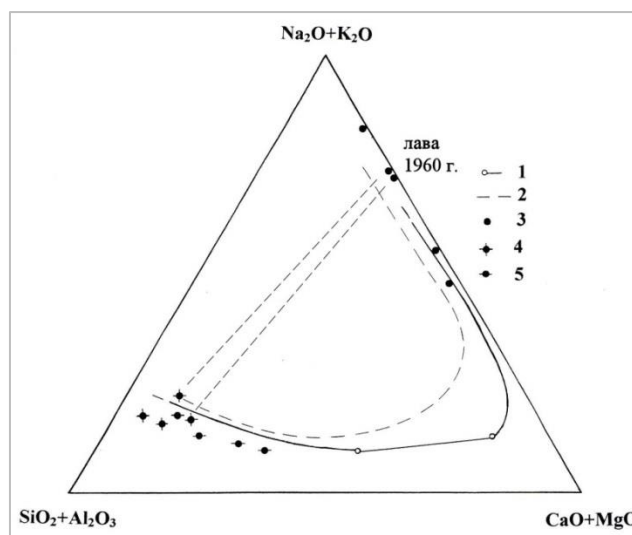


Рисунок 2 – Результаты экспериментального силикатно-карбонатного раслаивания расплавов при $T = 1100^{\circ}\text{C}$ (1) и 1250°C (2) и $P = 2$ кбар в сопоставлении с составами природных щелочных карбонатитов (3) и нефелинитов (4) вулкана Олдоиньо Ленгаи в Танзании (Dawson, 1989) и щелочных пород (нефелинитов, ийолитов, уртитов, мелилититов и т.п.) (5) карбонатитовых комплексов (Kjarsgaard and Hamilton, 1988)

Изучен характер разделения REE, Ba, Sr, Nb, Ta между фазами.

Выявляется зависимость характера разделения редких земель от температуры: при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 2$ кбар они преимущественно концентрируются силикатным расплавом. Это согласуется с данными Д.Л. Гамильтона и др. (Hamilton et.al., 1989). При $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 2 кбар накопление REE в карбонатной фазе зависит от исходного состава системы. Коэффициенты разделения ($K = C_{\text{карб.}}^{\text{REE}}/C_{\text{сил.}}^{\text{REE}}$) возрастают с уменьшением отношений $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ и $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ и увеличением $(\text{Al}+\text{Si})/(\text{Na}+\text{K}+\text{Ca})$. Экспериментальные зависимости K_{REE} от состава силикатного расплава, сосуществующего с карбонатным, можно описать полиномом вида $y = \exp(a+bx)$. Получены следующие уравнения (Сук, 2017):

$$K_{(\text{La,Ce})} = \exp[1.1832(\pm 0.035) - 2.99869(\pm 0.217) \times X], \text{ где } X = \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}), E_x = 0.047 \quad (1)$$

$$K_{(\text{La,Ce})} = \exp[1.20881(\pm 0.036) - 5.4712(\pm 0.389) \times X], \text{ где } X = \text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al}), E_x = 0.049 \quad (2)$$

$$K_{(\text{La,Ce})} = \exp[-3.48653(\pm 0.381) + 2.58544(\pm 0.230) \times X], \text{ где } X = (\text{Al}+\text{Si})/(\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}), E_x = 0.056 \quad (3)$$

Устанавливается неоднородность полученных карбонатных жидкостей, проявляющаяся в разделении карбонатной фазы на щелочную (преимущественно натровую) и щелочно-известковую (преимущественно кальциевую) фракции. При этом REE преимущественно концентрируются в известковой фракции.

Nb и Ta в изученных системах концентрируются в силикатном расплаве, а Ba и Sr накапливаются в карбонатных фазах. Это хорошо согласуется с предшествующими экспериментальными исследованиями (Koster van Groos, 1975; Veksler et.al., 1998).

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о возможности формирования карбонатитовых месторождений редких земель в связи со щелочным магматизмом.

Экспериментальное исследование жидкостной несмесимости во флюидно-магматических системах

Методика экспериментов

С целью изучения жидкостной несмесимости в кислых вулканитах проведено плавление в системе трахириолит – вода в специальных условиях, имитирующих вулканический процесс, то есть с понижением температуры и давления (Котельников и др., 2019). При $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 5 кбар в течение 2–6 часов проходило плавление, гомогенизация и насыщение расплава флюидными компонентами, затем осуществлялось понижение параметров до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 1 кбар с выдержкой 1 сутки. В конце экспериментов осуществлялась изобарическая закалка. Опыты проводили на установке высокого газового давления (УВГД) в платиновых ампулах в присутствии 14–15 мас. % воды.

В качестве исходного материала был использован трахириолит (СК-325-5, Yanev, 2003), отобранный из центрального ядра одного перлит-трахириолитового купола выжимания перлитового месторождения Голобрадово (вулкан Студен кладенец). В качестве индикаторных элементов, в суммарном количестве не более 4,3 мас. % от массы навески использовали La_2O_3 , Nb_2O_5 , SrO , RbCl , CsNO_3 , Cr_2O_3 , FeO , Na_2MoO_4 , Na_2WO_4 .

Состав продуктов опытов определяли методом локального рентгеноспектрального микроанализа. Использовали сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega II XMU (Tescan, Чехия), оснащенный системой для рентгеноспектрального микроанализа INCA Energy 450 с энергодисперсионным (INCAx-sight) рентгеновским спектрометром (Oxford Instruments, Англия) и программной платформой INCA Energy+.

Результаты экспериментов

При плавлении трахириолита при $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 5 кбар было получено гомогенное стекло, с небольшим количеством газовых пузырьков. Содержание воды в стекле, оцененное по сумме оксидов элементов (по данным микросондового анализа) составляет около 10 мас. %. В результате опытов, проведенных с понижением ТР-параметров, была получена силикат-силикатная жидкостная несмесимость с образованием

капель в основной массе расплава (Рис. 3). Состав капель близок к составу стекла основной массы (Котельников и др., 2019). В них отмечается некоторое увеличение коэффициента апгаитности (от 0,94 в основной массе до 0,95 в каплях), а также уменьшение мольной доли калия (от 0,5 до 0,38). В стекле основной массы содержание воды по сумме компонентов составляет 6,2 мас. %, в каплях около 2,8 мас. %.

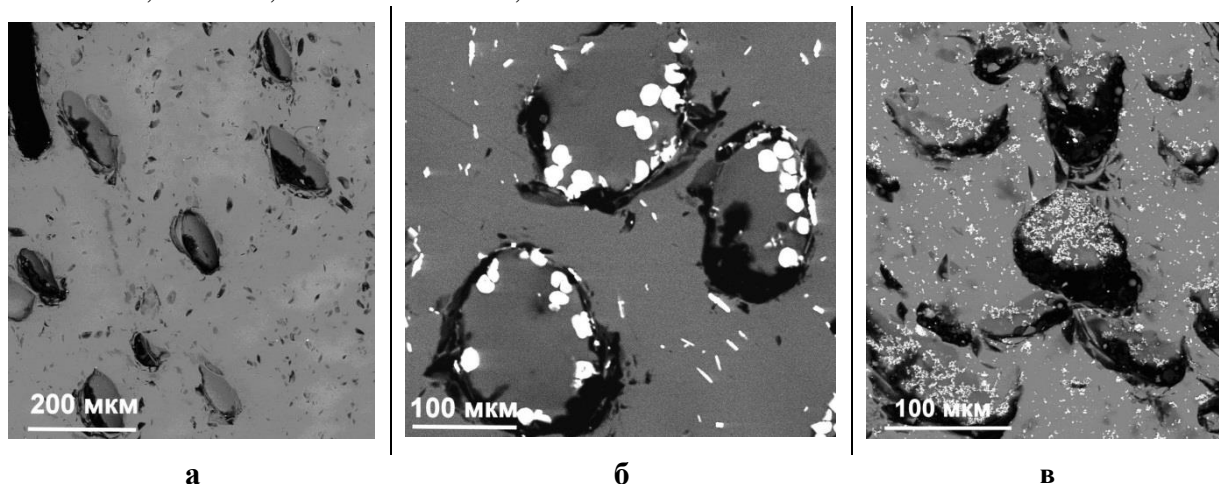


Рисунок 3 – Жидкостная несмесимость при плавлении трахириолита в условиях, имитирующих вулканический процесс (а); в экспериментах с добавками La, Nb, Sr (б); в экспериментах с добавками Fe и Cr (в)

Изучен характер разделения ряда элементов (La, Nb, Sr, W, Mo, Cr, Fe, Rb, Cs), которые использовались в качестве индикаторных компонентов, между полученными силикатными несмешивающимися фазами L_1 (матрица) и L_2 (капли) (Рис. 3). Выявлено обогащение фазы капель La, Nb (коэффициенты разделения оксидов этих элементов составляют ≈ 29 и ≈ 10 соответственно), Fe, Rb и Cs (коэффициенты разделения оксидов этих элементов равны 1,26, 2,01, 1,97 и 2,15, соответственно), Fe и Cr (коэффициенты разделения Fe (в пересчете на FeO) и Cr (в пересчете на Cr_2O_3) равны 4,25 и 7,43 соответственно), а также Mo и W (коэффициенты разделения которых в пересчете на MoO_3 и WO_3 равны 1,11 и 1,20 соответственно).

Таким образом, экспериментально воспроизведена силикат-силикатная жидкостная несмесимость с образованием капель в основной массе расплава. Состав капель сходен с составом основной массы, отличаясь только содержанием воды, индикаторных компонентов и соотношениями щелочных и щелочноземельных элементов.

Полученные экспериментальные данные демонстрируют важную роль жидкостной несмесимости как механизма концентрирования рудных элементов в магматических системах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 01–05–64839, 15–05–03393 и программы АААА–А18–118020590151–3.

Список литературы

1. Котельников А.Р. Жидкостная несмесимость во флюидно-магматических системах (экспериментальное исследование) / А.Р. Котельников, Н.И. Сук, З.А. Котельникова и др. // Петрология. 2019. Т. 27, № 2. С. 206–224.
2. Сук Н.И. Экспериментальное исследование несмесимости силикатно-карбонатных систем. / Н.И. Сук // Петрология. 2001. Т. 9, N 5. С. 547–558.
3. Сук Н.И. Жидкостная несмесимость в щелочных магматических системах / Н.И. Сук. М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. 238 с.
4. Ewart A. Chemical changes accompanying spherulitic crystallization in rhyolitic lavas, Central Volcanic Region, New Zealand / A. Ewart // Mineral. Mag. 1971. V. 38. pp. 424–434.

5. Dawson J.B. Sodium carbonate extrusions from Oldoinyo Lengai, Tanzania. Implications for carbonatite complex genesis / J.B. Dawson // Carbonatites. Genesis and evolution; Bell K., Ed. London: Unwyn Hyman, 1989. pp. 255–277.

6. Hamilton D.L. The behaviour of trace elements in the evolution of carbonatites / D.L. Hamilton, P. Bedson, J. Esson // Carbonatites. Genesis and evolution; Bell K., Ed. London: Unwyn Hyman, 1989. pp. 405–427.

7. Kjarsgaard B.A. Liquid immiscibility and the origin of alkali-poor carbonatites. / B.A. Kjarsgaard, D.L. Hamilton // Miner. Magaz. 1988. V. 52. pp. 43–55.

8. Koster van Groos A.F. The distribution of strontium between coexisting silicate and carbonate liquids at elevated pressures and temperatures / A.F. van Groos Koster // Geochim. Cosmochim. Acta. 1975. V. 39. pp. 27–34.

9. Veksler I.V. Trace Element Partitioning in Immiscible Silicate-Carbonate Liquid Systems: an Initial Experimental Study Using a Centrifuge Autoclave / I.V. Veksler, C. Petibon, G.A. Jenner et al. // Journal of Petrology. 1998. V. 39. № 11–12. pp. 2095–2104.

10. Yanev Y. Petrology of Golobradovo perlite deposit, Eastern Rhodopes. / Y. Yanev. // Geochem. Mineral. Petrol. Sofia. 2003. V. 40. pp. 1–20.

УДК 551.2.03:66.083+551.21

Fluid-magmatic systems in the decompression regime and volcanism processes

Alexey Kotelnikov¹, Nataliya Suk¹, Zoya Kotelnikova^{1,2}

¹D.S. Korzhinsky Institute of experimental mineralogy, Russia

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Biochemistry RAS, Moscow, Russia
kotelnik@iem.ac.ru

The properties of fluids and fluid-magmatic systems are considered in the paper. Particular attention is paid to the issues of heterogenization of these systems in the decompression regime, which is associated with (1) a decrease in solubility of volatile components with decreasing pressure; (2) the properties of silicate systems as salts of type II (P-Q), which are characterized by liquid immiscibility.

Keywords: fluid-magmatic systems, immiscibility, heterogenization

Флюидно-магматические системы в режиме декомпрессии и процессы вулканизма

А.Р. Котельников¹, Н.И. Сук^{1,2}, З.А. Котельникова^{1,2}

¹Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

В работе рассмотрены свойства флюидов и флюидно-магматических систем. Особое внимание уделено вопросам гетерогенизации указанных систем в режиме декомпрессии, которая связана (1) со снижением растворимости летучих компонентов при уменьшении давления; (2) свойствами силикатных систем как солей II-го (P-Q) типа, для которых характерна жидкостная несмесимость.

Ключевые слова: флюидно-магматические системы, несмесимость, гетерогенизация

Особенности эндогенного петрогенеза определяются процессами дифференциации по кристаллизационному типу или путем расслоения магм во флюидно-магматических системах. Экспериментально наиболее изучены процессы кристаллизационной дифференциации. Было показано, что температура ликвидуса и ход кристаллизации зависят

от количества растворенных в магме солей и летучих компонентов. Образование магматических расплавов в верхней мантии и в земной коре в большинстве случаев связано с подтоком тепла и флюидов. Водосодержащие флюиды в силу своей высокой теплоемкости являются, по-видимому, основными переносчиками тепла. Кроме того, флюиды могут поставлять ряд растворенных в них компонентов, снижающих температуры ликвидуса вещества (Рис. 1). В работах академиков Д.С. Коржинского (1969) и В.А. Жарикова (1976, 2005 гг.) были введены специальные термины для описания указанных процессов: «магматическое замещение» и «транзмагматический флюид». То есть выплавление магматического расплава происходит в потоке флюида (образованного либо поднятием мантийного плюма, либо дегазацией мантийного клина в зонах субдукции). Отсюда логично вытекает тезис о насыщении флюидами природных магм.

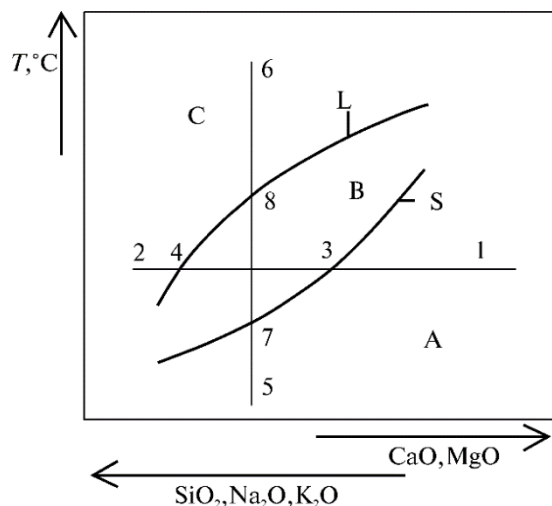


Рисунок 1 – Плавление породы при увеличении потенциала щелочей и кремнезема (при $T = const$).

Обозначения:

- 1–2 – изотермическое сечение;
- 3 – точка пересечения солидуса с линией 1–2;
- 4 – точка пересечения кривой ликвидуса с линией 1–2;
- 5–6 – сечение при постоянных потенциалах $CaO, MgO, SiO_2, Na_2O, K_2O$.
- Точки 7 и 8 – пересечения сечения 5–6 с кривыми солидуса и ликвидуса соответственно

Рассмотрим флюидно-магматические системы последовательно: а) флюиды (1) простейшие – однокомпонентные; (2) двух- и более компонентные; б) флюидонасыщенные расплавы. Можно классифицировать флюиды по их взаимодействию с силикатными (или алюмосиликатными) фазами. По этому признаку выделяются три группы:

- 1) нейтральные (такие газы как азот, гелий и другие нейтральные газы);
- 2) низкоактивные (вода, уголекислота, их смеси и некоторые водно-солевые системы);
- 3) активные флюиды (водные растворы систем P-Q типа).

Свойства флюидов, а также всех остальных состояний вещества описываются уравнением состояния. Уравнение состояния дает функциональную связь между давлением, температурой и объемом вещества определенного состава и фазового состояния. Графическое изображение этих зависимостей дается фазовой диаграммой (диаграммой состояния). Например, уравнение состояния (Ван-дер-Ваальса) имеет следующий вид:

$$(P + a / V^2) (V - b) = RT \quad (1)$$

Наиболее распространенной моделью природных флюидов является система $H_2O - CO_2 - NaCl$. Рассмотрим диаграммы составов воды и уголекислоты. В P-T-координатах в области выше нуля (по Цельсию) они характеризуются наличием двухфазных кривых жидкость + пар и критическими точками. Координаты критической точки воды: 374 °C и 221 бар; уголекислоты: 31 °C, 74 бар. Вблизи критической точки резко (на несколько порядков!) возрастают теплопроводность, массоперенос, реакционная способность, очень сильно снижается вязкость среды. Отметим, что для однокомпонентной системы критическая точка, для бинарной – критическая кривая, для тройной – критическая поверхность и т.д.

Бинарные системы вода – соль и вода – уголекислота неидеальны, при снижении давления ($T = const$) в них наблюдаются явления несмесимости. Также и в тройной системе $H_2O - CO_2 - NaCl$ при снижении давления увеличиваются размеры области гетерогенизации.

Таким образом, снижение давления (декомпрессия) вызывает увеличение области несмесимости всех указанных флюидных систем. Системы вода – соль подразделяются на системы первого или второго типа. Система I-го типа: кривая трехфазного равновесия (G+L+S) не пересекает критическую кривую системы. Система II-го (P-Q) типа: кривая трехфазного равновесия (G+L+S) пересекает критическую кривую системы (Рис. 2). К солям первого типа относятся такие как NaCl, KCl, CaCl₂, к солям II-го типа – LiF, NaF, Na₂CO₃, Na₂SO₄, Na₂Si₂O₇, SiO₂. По современным данным к системам II-го (P-Q) типа относятся многие силикатные системы в присутствии воды. Все системы P-Q типа характеризуются областью несмесимости выше точки Q. Области гетерогенизации систем расширяются при снижении давления. Магматический расплав, сформированный в верхней мантии или в нижней коре, насыщен по ряду летучих компонентов (H₂O, CO₂, S, Cl). При подъеме расплава (в режиме декомпрессии) начинаются явления гетерогенизации. Так при давлении меньше 15 кбар, резко снижается растворимость сульфидов и происходит образование капель моносульфида железа. При снижении давления до 5 кбар, растворимость сульфидов в расплаве меняется на порядок: с ~1 мас. % (15 кбар) до 0,1 % (5 кбар). Растворимость углекислоты в магматическом расплаве резко снижается при давлении ниже 8–9 кбар. При снижении давления ниже 5 кбар начинается заметное отделение водной фазы. Растворимость хлора в расплавах резко (в ~5 раз) снижается при P < 2 кбар.

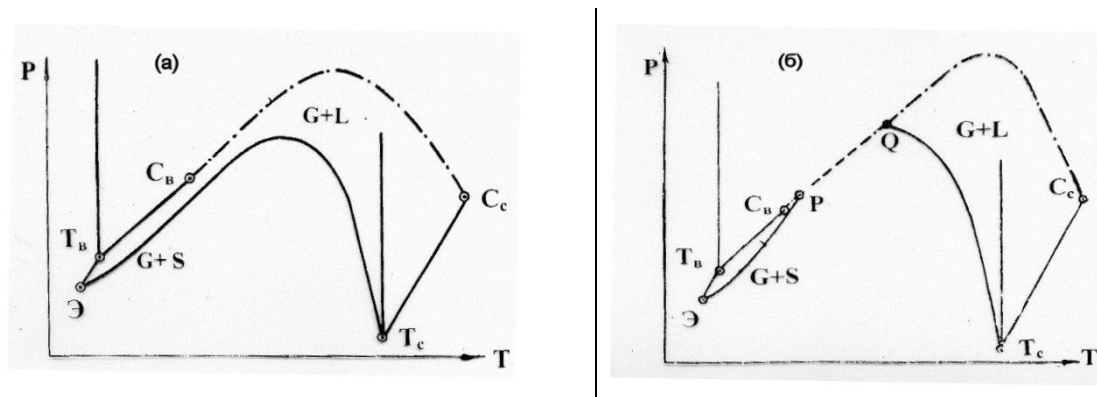


Рисунок 2 – Различные типы водно-солевых систем: (а) система I-го типа (критическая кривая не пересекает кривую трехфазного равновесия; (б) система II-го (P-Q) типа, критическая кривая пересекает кривую трехфазного равновесия (Равич М.И., 1974)

Отметим, что все диаграммы вода – силикатный минерал относятся ко второму (P-Q) типу, осложненному областью расслоения (Жариков, 1976, 2005; Равич, 1974). В случае гетерогенизации такой системы, обусловленной снижением давления, несмесимые жидкие фазы, назовем их условно L₁ и L₂, должны отличаться друг от друга только содержанием воды. Поэтому, если удастся закалить равновесие этих фаз (L₁ и L₂) в системе вода – алюмосиликатный расплав, возможно обнаружение границ между двумя несмесимыми алюмосиликатными фазами, близкими по составу. Таким образом, существует возможность получить объяснение феномена образования шаровых «глобулей» в вулканических породах. Именно существование природных вулканитов, для которых характерно наличие в основной массе изометричных округлых образований, отличительной особенностью которых является практически их полная идентичность по химическому составу с вмещающей породой, позволило предположить, что в данном случае имела место жидкостная несмесимость. Один из таких объектов описан в работе (Encheva, Yanev, 2015). Подобные случаи отмечены также для субвулканических пород Западной Камчатки и современных лав вулкана Кизимен (Камчатка). В случае алюмосиликатного расплава, пересыщенного флюидом, при определенных условиях может быть реализована жидкостная несмесимость (L₁ + L₂). Как видно из рис. 3а, 3б, такое явление может происходить при снижении общего давления в изотермических условиях или при снижении температуры. Такие условия характерны для вулканического процесса, внедрения в верхние части коры интрузий (нижнекорового или мантийного генезиса). Кроме того, при определенных P-T-X параметрах жидкостная

несмесимость может иметь место и при генерации магматических расплавов (в процессах гранитизации или высокотемпературного метасоматоза). Что может служить индикатором феномена жидкостной несмесимости в природных объектах? Исходя из наших опытов по плавлению трахириолитов, составы фаз L_1 и L_2 сходны, и в процессах относительно медленной кристаллизации, характерной для интрузивных пород, мы можем не заметить различий в химическом или минеральном составе (по главным порообразующим элементам). В этом плане процессы вулканизма дают нам уникальную возможность быстрой «заковки» (к сожалению, неизобарической) фазовых соотношений во флюидно-магматической системе. Именно поэтому петрологи, изучающие вулканические породы, с давних пор обращали внимание на присутствие субсферических включений практически того же состава, что и основная масса. Это можно объяснить быстрой заковкой системы с жидкостной несмесимостью типа $L_1 + L_2$. При этом происходит практически полная дегазация флюидно-магматической системы и составы несмесимых фаз становятся идентичными друг другу. Нами был экспериментально смоделирован процесс гетерогенизации алюмосиликатного водонасыщенного расплава при декомпрессии. В результате проведенных экспериментов по плавлению трахириолита в условиях, имитирующих вулканический процесс, т.е. в условиях понижения температуры и давления, характерных для процесса извержения магмы, было получено расслаивание с обособлением близких по составу расплавов. Они различаются по содержанию воды, индикаторных компонентов и соотношению щелочных и щелочноземельных элементов.

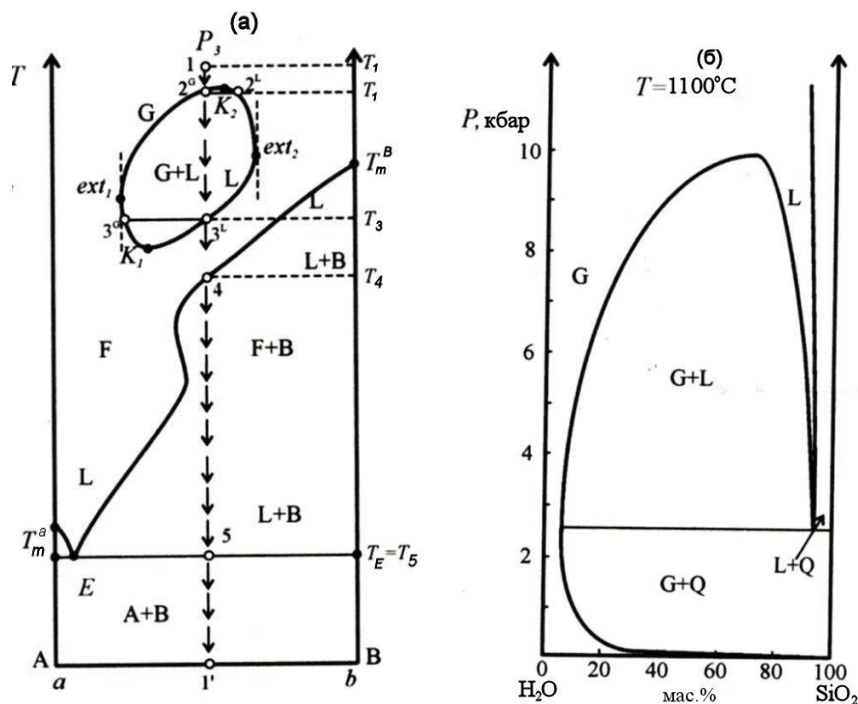


Рисунок 3 – Фазовые диаграммы систем «силикат–летучий».
 (а) – T - x сечение системы «силикат–летучий» (Жариков, 2005);
 (б) – P - x сечение системы вода–кварц (Kennedy et al., 1962)

Таким образом, показано, что гетерогенизация в природных водонасыщенных силикатных расплавах в режиме декомпрессии может вызываться различными факторами: 1) снижением растворимости летучих компонентов при уменьшении давления; 2) свойствами силикатных систем, таких как соли II-го (P-Q) типа, для которых характерна жидкостная несмесимость. Эти факторы необходимо учитывать при построении моделей вулканического процесса.

Работа выполнена при поддержке программы АААА-А18-118020590151-3.

Список литературы

1. Жариков В.А. Основы физико-химической петрологии. М.: Изд. МГУ, 1976. 420 с.
2. Жариков В.А. Основы физической геохимии. М.: Изд. МГУ, 2005. 654 с.
3. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1969. 109 с.
4. Равич М.И. Водно-солевые системы при повышенных температурах и давлениях. М.: Наука, 1974. 151 с.
5. Encheva S. Zeolitized inclusions in trachyrhyolitic spheruloids of the perlite deposit Golobradovo (Studen Kladenets Oligocene volcano, Eastern Rhodopes) / S. Encheva, Y. Yanev // VII International Symposium «Mineral diversity: research and preservation». 11–14 October 2013. Earth and Man National Museum, Sofia. 2015. pp. 177–184.
6. Kennedy G.C. The upper three – phase region in the system $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$ / G.C. Kennedy, G.J. Wasserburg, H.C. Heard et al. // J. Amer. Sci. 1962. V. 260, № 7. pp. 501–521.

УДК 519.684.4+550.394.2

PC based fast numerical modeling

Mikhail Lavrentiev^{1,2}, Andrey Marchuk^{1,3}, Konstantin Oblaukhov¹, Alexey Romanenko²

¹*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia
lavrentiev@iae.nsk.su*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

³*Institute of Computational Mathematics & Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

In the presented paper on a number of examples from the field of the Earth Sciences we show the possibility of a significant acceleration of numerical calculations based on a personal computer (PC) through the use of modern graphic processors (Graphic Processing Unit – GPU) and reconfigurable microchips (Field Programmable Gates Array – FPGA). The focus is given to the calculation of the propagation of the tsunami wave. It was possible to achieve an acceleration of the code execution by about 300 times in comparison with the PC, which gives grounds to speak about obtaining a reasonable forecast of the danger of a tsunami wave on the protected coastal areas within minutes after the seismic event. This is especially important in the case of near-field events, when a destructive wave can reach the coast 20–30 minutes after an underwater earthquake.

Keywords: code acceleration, field programmable gates array, tsunami wave

Быстрое численное моделирование на базе персонального компьютера

М.М. Лаврентьев^{1,2}, А.Г. Марчук^{1,3}, К.К. Облаухов¹, А.А. Романенко²

¹*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

³*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

В работе на ряде примеров из области наук о Земле показана возможность существенного ускорения расчетов на базе персонального компьютера (ПК) за счет применения современных графических процессоров (Graphic Processing Unit – GPU) и вентиляемых матриц программируемых пользователем (Field Programmable Gates Array – FPGA). Наибольшее внимание уделено расчету распространения волны цунами. Удалось достигнуть ускорения счета примерно в 300 раз по сравнению с ПК, что дает основание говорить о получении обоснованного прогноза опасности волны цунами на защищаемых участках побережья уже через минуты после сейсмического события. Это особенно важно в случае событий ближней зоны, когда разрушительная волна может достигать побережья спустя 20–30 минут после подводного землетрясения.

Ключевые слова: ускорение расчетов, вентильные матрицы программируемые пользователем, волна цунами

Введение

Уже достаточно долгое время продолжается стремительный рост производительности вычислительных систем. Современных суперкомпьютеры делают возможным численное исследование все более детальных моделей физических процессов. Однако, очень часто требуется оценить параметры решения (изучаемой среды или физического явления) в полевых условиях или рассмотреть различные варианты на рабочем месте, чтобы впоследствии рационально использовать ресурс суперкомпьютерной системы, за который, как правило, следует платить. В состав современного персонального компьютера (ПК) или ноутбука входит так называемый графический ускоритель, который сам по себе уже имеет значительную вычислительную мощность. Вычислительная мощность графических процессоров (GPU) достигается за счет большого количества вычислительных элементов и специальной архитектуры (SIMD – Single Instruction Multiple Data – в классификации Флинна). Целесообразно использовать эти возможности.

Если вычислительный алгоритм допускает параллельное исполнение, использование потенциала GPU может существенно ускорить процесс вычислений. Еще более высокой производительности можно добиться за счет использования специализированного вычислителя на базе вентильных матриц программируемых пользователем (FPGA), где на языке программирования высокого уровня фактически задается архитектура вычислительного устройства.

Технические характеристики GPU и достигнутое ускорение на модельных задачах

На текущий момент существуют как рабочие станции (до 4 графических процессоров на борту), так и стоечные варианты с 8-ью графическими процессорами (сервера DGX).

Некоторые параметры графических процессоров приведены в таблице ниже.

Таблица 1. Основные параметры современных GPU компании Nvidia – лидера отрасли

Параметр	Модель			
	V100-PCIe	V100-SXM2	A100-PCIe	A100-SXM4
Число ядер	5120	5120	7936	7936
Пиковая производительность				
FP64	7 TF	7.8 TF	9.7 TF	9.7 TF
FP64 Tensor core			19.5 TF	19.5 TF
FP32	14 TF	15.7 TF	19.5 TF	19.5 TF
FP32 Tensor core	112 TF	125 TF	156 TF	156 TF
Память (GB)	16/32	16/32	40	40/80

На сегодня существует несколько сотен пакетов и библиотек с открытым исходным кодом, адаптированных для использования с GPU (см., например, «GPU-ACCELERATED APPLICATIONS» на сайте <https://images.nvidia.com/aem-dam/Solutions/Data-Center/tesla-product-literature/gpu-applications-catalog.pdf>). В зависимости от типа проблемы сообщается о приросте производительности от десятков до сотен раз. Нижеприведенные примеры являются практическими задачами в области наук о Земле.

Сейсмические данные, получаемые в полевых условиях, имеют большой объем, (несколько терабайт и более), данные зашумлены и пр. Применение преобразование Фурье на нерегулярных сетках – один из алгоритмов, используемых в предобработке данных. С его помощью можно производить сжатие данных, их фильтрацию, заполнение пробелов и пр. Реализованные на GPU прямое и обратное преобразование Фурье позволило в 40 и более раз ускорить процесс предобработки сейсмических данных (Nikitin et al, 2013). В реальной жизни для редких задач удается найти аналитическое решение. Попытка получить такое решение для задачи распространения волн была предпринята в ИНГиГ СО РАН. Задача была сведена к перемножению очень больших матриц (в миллионы элементов по главной

диагонали). Перенесение алгоритма на графический процессор позволило решать подобного рода задачи за адекватное время (Zyatkov et al, 2013).

Свойства FPGA

Вентильные матрицы программируемые пользователем (ВМПП) используются для различных задач начиная с 1990-х годов. Первоначально наибольшее применение нашли вариации ВМПП – программируемых логических матриц (ПЛИМ – PLD/CPLD), которые успешно применялись для решения небольших задач по разработке автономных устройств и контроллеров, имеющих малое энергопотребление и масса-габаритные размеры. Значительное увеличение количества логических элементов и возможность перепрограммирования стало возможным при появлении FPGA (Field-Programmable Gate Array), позволяющих реализовывать трудоемкие математические алгоритмы обработки данных, а также выполнять прототипирование вычислительных устройств (в том числе процессоров CPU и GPU) для дальнейшего производства серийных заказных микросхем ASIC.

Появившаяся несколько лет назад технология High-Level Synthesis (HLS) позволяет использовать для описания цифровых схем C-подобный язык. Это является новым витком развития в способах создания различных вычислительных устройств, обеспечивающим полный цикл: от описания архитектуры до верификации проекта с использованием различных средств моделирования. HLS представляет собой автоматизированный процесс проектирования, который интерпретирует алгоритмическое описание поведенческой модели и позволяет создавать цифровые устройства, которые четко реализуют заданные условия. С помощью HLS можно легко изменять параметры конвейера, подстраиваясь под временные (timing) или пространственные (utilization) требования. Технология HLS позволяет производить верификацию программного кода до его преобразования в схему для конкретной микросхемы FPGA.

Именно технология HLS и большие ресурсы современных микросхем FPGA позволяет сегодня применять их для решения новых типов задач в различных областях приложений. Современные микросхемы программируемой логики FPGA обеспечивают параллельное исполнение до сотен тысяч одновременных потоков, при этом объем внутренней памяти достигает сотен МБ, позволяя строить достаточно широкие и глубокие вычислительные конвейеры.

Спецвычислитель для расчета распространения волны цунами

В случае подводного землетрясения у побережья Японии волна цунами достигает ближайшей точки побережья уже примерно через 20 минут, что накладывает жесткие ограничения на время моделирования. Математически процесс хорошо описывается системой уравнений мелкой воды (Titov, Gonzalez, 1977). Для ускорения решения системы по схеме МакКормака (Lavrentiev et al, 2021) был спроектирован аппаратный вычислитель (спецпроцессор) на базе FPGA Xilinx Virtex-7 VC709 (Lavrentiev et al, 2017). Ниже представлены блок-схема спецпроцессора (Рис. 1) и общий вид печатной платы (Рис. 2).

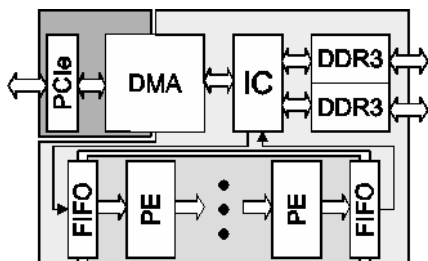


Рисунок 1 – Архитектура спецпроцессора



Рисунок 2 – Общий вид печатной платы для работы в составе ПК

Тестирование

Сравнение с известными точными решениями системы уравнений мелкой воды в случае плоского наклонного (Marchuk, 2015) и параболического дна, а также с программным пакетом MOST (Method Of Splitting Tsunami – официальный инструмент Центров

предупреждения о цунами США) показал как хорошую точность (Рис. 3), так и высокое быстродействие предложенного метода (Lavrentiev et al, 2021).

В численном эксперименте (см. Рис. 4) использовался модельный источник цунами протяженностью 500 км что по порядку очагам цунами 1952 года у берегов Камчатки и 2011 года у побережья Японии, но амплитуда у этого источника принимается равной + 200 см. Численное моделирование на расчётной сетке 3120×2400 узлов показывает, что основная волна приближается к ближайшему берегу приблизительно через 1600 секунд после землетрясения. Расчет распределения максимальной высоты вдоль всей рассматриваемой береговой линии занимает всего несколько секунд, всего лишь 5,98 сек. для микрочипа VC709. Прирост производительности, достигаемый предлагаемым калькулятором FPGA, почти в 250 раз по сравнению с программным обеспечением MOST.

Заключение

Как показывают приведенные примеры, при решении отдельных задач за счет применения аппаратного ускорения расчетов (а именно архитектур GPU или FPGA) можно достигнуть «суперкомпьютерной производительности» при использовании персонального компьютера.

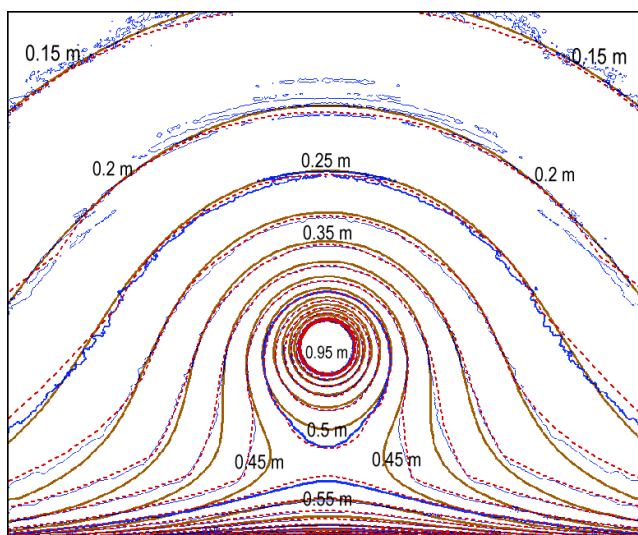


Рисунок 3 – Изолинии максимальных высот волны: точное решение системы мелкой воды (коричневый), результат использования спецвычислителя (красный) и MOST (голубой)

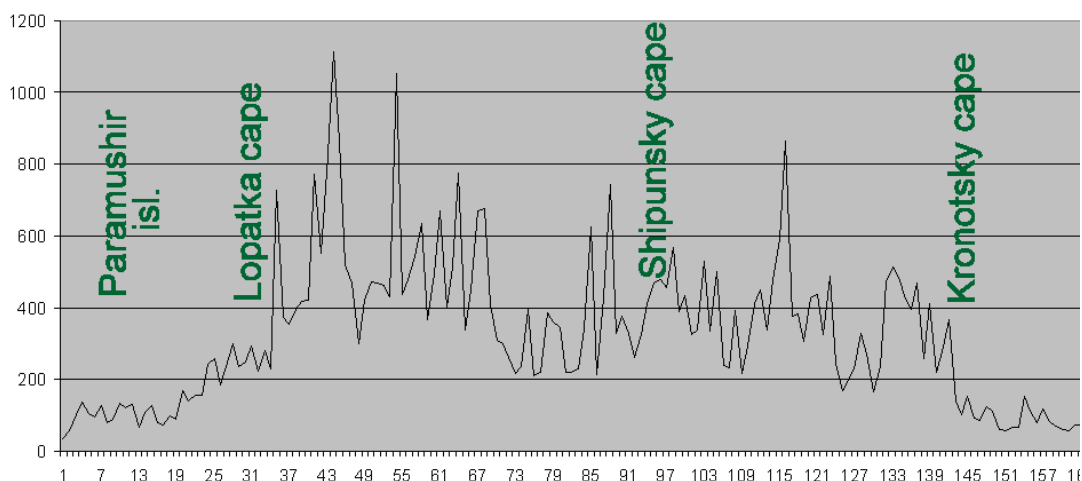


Рисунок 4 – Распределение максимумов волн цунами (в сантиметрах) вдоль побережий северных Курил и Камчатки, полученное с помощью Спецвычислителя на базе FPGA

Список литературы

1. *Lavrentiev M.* Hardware Acceleration of Tsunami Wave Propagation Modeling in the Southern Part of Japan / *M. Lavrentiev, K. Lysakov, An. Marchuk et al.* // Applied Sciences. 2020. 10 № 12. pp. 4159.
2. *Lavrentiev M.* FPGA Based Solution for Fast Tsunami Wave Propagation Modeling / *M. Lavrentiev, A. Romanenko, K. Oblaukhov et al.* // Proc. 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 25–30 June, San Francisco, California, 2017. pp. 924–929.
3. *Marchuk A.G.* Estimating Tsunami Wave Height over a Sloping Bottom in the Ray Approximation / *A.G. Marchuk* // Numerical Analysis and Applications. 2015. V. 8, № 4. pp. 304–313.
4. *Nikitin V.V.* Parallel algorithm of 3D wave decomposition and its application in geoscience / *V.V. Nikitin, A. A. Duchkov, A.A. Romanenko, F. Anderson* // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11. № 1. С. 93–104.
5. *Titov V.V.* Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model / *V. V. Titov, F. I. Gonzalez* // NOAA Technical Memorandum ERL PMEL–112, 1977.
6. *Zyatkov N.* Highly-optimized TWSM Algorithm for Modeling Cascade Diffraction in Terms of Propagation-absorption Matrices / *N. Zyatkov, A. Ayzenberg, A. M. Aizenberg, A. Romanenko* // Extended Abstracts, 75th Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, London, England, 10–13 June 2013, Th-P02–11 /

УДК 622.032

Estimation of well efficiency in the par-lift extraction of coolant at the Mutnovsky field (Kamchatka) during the development of deep horizons

Alexander Shulyupin¹, Alexey Lyubin², Ivan Chernev²

¹*Mining Institute FEB RAS, Khabarovsk, Russia
ans714@mail.ru*

²*Kamchatskenergo PJSC branch Renewable energy, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia
Lyubin-AA@kamenergo.ru, Chernev-II@kamenergo.ru*

During the development of the Mutnovsky geothermal field (Kamchatka), which is a key object of the Russian geothermal energy, problems were discovered related to a decrease in pressure in the reservoir that feeds the production wells, which leads to the withdrawal of the wells from operation. This paper predicts the productivity of planned drilling wells, 3 and 4 km deep, to develop the deeper horizons of the Mutnovsky field. Forecast results were compared with data from a typical production well with a depth of 2 km. The comparison showed the promise of development of deeper horizons of the field. In particular, a significant increase in the flow rate of steam produced by a single well is expected (2,3 and 3,1 times by wells 3 and 4 km, respectively, compared to a typical 2 km well). It is also expected that a significant increase in the rate of geothermal energy production due to increasing the allowable reduction of pressure (depression) in the reservoir (2,7 and 4,8 times, respectively, by wells 3 and 4 km, compared with the type well 2 km) and involvement in the heat supply of the additional arrays of rocks that contains the produced fluid.

Keywords: geothermal field, geothermal reservoir, production well, par-lift, allowable depression in the reservoir, fluid, steam, water-steam mixture

Оценка эффективности скважины при парлифтовой добычи теплоносителя на Мутновском месторождении (Камчатка) при разработке глубинных горизонтов

А.А. Любин¹, А.Н. Шулюпин², И.И. Чернев¹

¹Филиал ПАО «Камчатскэнерго» Возобновляемая энергетика, ул. Ак. Королева, 60, 680009, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

²Институт горного дела ДВО РАН, ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия

В процессе разработки Мутновского геотермального месторождения (Камчатка), являющегося ключевым объектом отечественной геотермальной энергетики, обнаружилось проблемы, связанные со снижением давления в резервуаре, питающем добычные скважины, которые приводят к выводу скважин из эксплуатации. В настоящей работе прогнозируется производительность планируемых к бурению скважин, глубиной 3 и 4 км, для освоения более глубоких горизонтов Мутновском месторождения. Прогнозные результаты сравнивались с данными по типовой добычной скважине, глубиной 2 км. Сравнение показало перспективность освоения более глубоких горизонтов данного месторождения. В частности, ожидается существенное увеличение расхода пара, добываемого одиночной скважиной (в 2,3 и 3,1 раза скважинами 3 и 4 км, соответственно, по сравнению с типовой скважиной 2 км). Также ожидается возможность существенного увеличения объемов добычи геотермальной энергии за счет увеличения допустимого снижения давления (депрессии) в резервуаре (в 2,7 и 4,8 раза скважинами 3 и 4 км, соответственно, по сравнению с типовой скважиной 2 км) и привлечения к тепловому питанию дополнительного объема массива пород, вмещающих добываемый флюид.

Ключевые слова: геотермальное месторождение, геотермальный резервуар, добычная скважина, парлифт, допустимая депрессия в резервуаре, флюид, пар, пароводяная смесь

Введение

Масштабное освоение геотермальных ресурсов, начавшееся в прошлом веке, не потеряло актуальность и в настоящее время (Bertani, 2016, Lund and Boyd, 2016). При этом, в связи с расширением коммерческого использования геотермальных ресурсов, наряду с развитием инновационных технологий, таких как применение скважинных теплообменников (Kayaci and Demir, 2020, Kumar and Murugesan, 2020, Luo et al, 2020, Moore and Hollander, 2021) и создание улучшенных геотермальных систем (Hu et al. 2020, Templeton, 2020, Renauld et al., 2019, Zang et al, 2019), особое внимание стало уделяться вопросам эффективности применяемых технологий (Шулюпин и др., 2020).

Ключевым объектом отечественной геотермальной энергетики является Мутновское месторождение (Камчатка), обеспечивающее теплоносителем две электростанции, вырабатывающие более 80 % отечественной электроэнергии, получаемой за счет геотермальных ресурсов. Данное месторождение обладает вододоминирующим резервуаром трещинно-жильного типа, т.е. содержит однофазный флюид (воду, исключая расположенные в верхней части локальные паровые «шапки»), характеризуется многочисленными субвертикальными продуктивными зонами. В настоящее время месторождение освоено до глубины 2 км и располагает добычными скважинами, поднимающими теплоноситель на поверхность за счет парлифта, сопровождающегося интенсивным парообразованием в стволе скважин.

Одной из проблем разработки Мутновского месторождения является снижение давления в геотермальном резервуаре в процессе эксплуатации. В результате этого, давление на забое добычных скважин снижается до предельных значений, ниже которых парлифт уже не может обеспечить подъем флюида (Васякович и др., 2019), скважина самопроизвольно прекращает работу (на практике используется термин – «самозадавливается»). В этой связи представляет интерес идея перехода к освоению более глубоких горизонтов, что позволит увеличить протяженность пароводяного участка в скважине, характеризуемого меньшими

градиентами давления по сравнению градиентами в резервуаре, что позволяет увеличить депрессию на забое скважины, увеличивая эффективность парлифта. Практическое продвижение данной идеи невозможно без оценки потенциальных преимуществ, которые может обеспечить парлифтная технология добычи в случае предполагаемых вариантах ее реализации при переходе к освоению глубоких горизонтов.

В настоящей работе прогнозируется, на основе анализа имеющихся данных о Мутновском геотермальном месторождении и математического моделирования процессов в добычных скважинах, производительность планируемых к бурению скважин для освоения более глубоких горизонтов месторождения. Расчеты осуществлялись для запланированной конструкции скважин, глубиной 3 и 4 км, и полученные результаты сравнивались с данными по типовой добычной скважине, глубиной 2 км.

Методика оценки производительности на примере типовой скважины

На Мутновском геотермальном месторождении пробурено 95 скважин, глубиной от 466 до 2500 м, имеющих различные внутренние диаметры обсадных колонн и имеющих различные условия вскрытия геотермального резервуара. 12 скважин пробурены с наклоном от вертикальной оси. В настоящее время добыча теплоносителя ведется 15 скважинами. Учитывая расходные параметры и конструкцию добычных скважин, для типовой скважины принимаем: устьевое давление – 7 бар, расход – 40 кг/с, энтальпия флюида (в пароводяном состоянии) 1200 кДж/кг, скважина вертикальная, глубина – 2000 м, внутренний диаметр до глубины 1100 м – 0,225 м, глубже 1100 м – 0,152 м, область питания находится в интервале от 1400 до 2000 м.

Основной характеристикой производительности скважины является график зависимости ее расхода от устьевого давления, называемый графиком производительности. График производительности скважины определяется условиям питания, а именно, зависимостью расхода поступающего в скважину флюида от забойного давления. Кроме того, на график производительности пароводяной скважины существенно влияют условия течения в ее внутреннем канале. Как показано в (James, 1970), учет гидродинамических процессов в стволе скважины способен обеспечить прогнозируемые графики производительности, близкие к практически наблюдаемым, даже в случае принятия забойного давления постоянным, одинаковым для различных расходов.

Чтобы исключить необходимость рассмотрения гидродинамических процессов в стволе скважины в области ее питания, в настоящей работе в качестве характеристики забойного давления используется давление в скважине на уровне верхней границы области питания. Зависимость этого давления (расчет осуществлялся по программе WELL-4 (Шулюпин, Чермошенцева, 2016)) от расхода при различных устьевых давлениях, принимаемых в пределах построения одного графика постоянными, для типовой конструкции и энтальпии, представлен на рис. 1. Слияние линий при больших расходах и малых устьевых давлениях объясняется достижением на выходе из скважины условий для формирования критического потока. В этом случае параметры течения становятся независимыми от снижения давления вниз по потоку, т.е. снижение устьевого давления не сказывается на течении в скважине, фактически на устье формируется скачек давления, и при изменении давления вниз по потоку давление вверх по потоку остается неизменным.

График производительности определяется точками пересечения представленных на рис. 1 характеристик скважины с графиком зависимости забойного давления от расхода, характеризующего приток флюида из резервуара (Дрознин, 1980). Как отмечалось, добиться неплохого согласования расчетных и опытных графиков производительности можно даже принимая в качестве характеристики резервуара постоянное, не зависящее от расхода давление. Учитывая это, а также сложность нахождения детальной характеристики притока из резервуара, в настоящей работе для характеристики резервуара используется прямая линия, что соответствует стационарному притоку при линейном законе фильтрации в резервуаре

$$p_z = p_a - bG, \quad (1)$$

где p_z и p_a – давление на забое скважины и в резервуаре на границе воронки депрессии, вызванной работой скважины, G – массовый расход, b – угловой коэффициент.

Используя известную формулу Дюпюи (Дрознин, 1980), для углового коэффициента имеем

$$b = \frac{\nu \ln(R/r)}{2\pi kM}, \quad (2)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости флюида, R – радиус пьезометрической воронки, r – радиус скважины, k и M – коэффициент проницаемости в резервуаре и размер (протяженность в скважине) области питания.

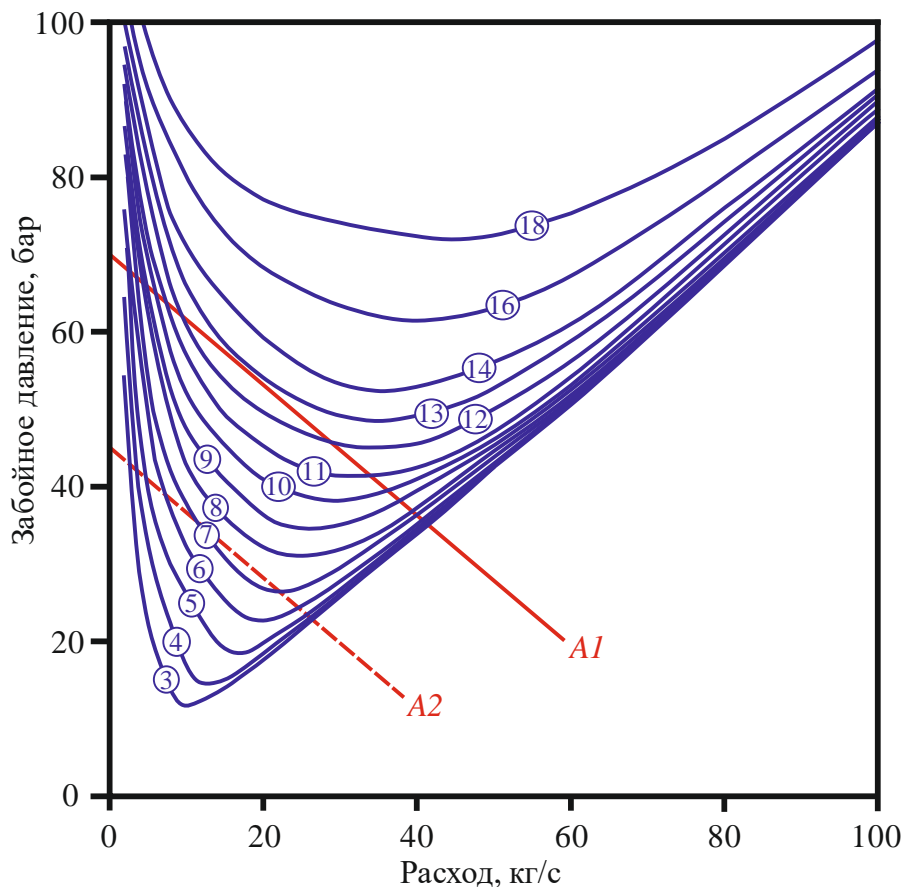


Рисунок 1 – Характеристики типовой (по конструкции и энтальпии флюида) скважины Мутновского месторождения при различных устьевых давлениях (давление в барах указано на линиях), и характеристики притока из резервуара: A1 – для типовых условий, A2 – при предельном для эксплуатации падении давления в резервуаре

Для давления в резервуаре на границе воронки депрессии, вызванной работой скважины, используется текущее типовое давление в наблюдательных скважинах на глубине 1400 м – 70 бар. Для второй точки, необходимой для построения прямой линии, использовалась точка на характеристике скважины, соответствующая типовым значениям (давление 7 бар, расход 40 кг/с). Это позволило определить типовую характеристику притока из резервуара (линия A1 на рис. 1), угловой коэффициент которой равен 84200 Па × с/кг.

Расчетный график производительности типовой скважины, построенный по точкам пересечения характеристик скважины при различных устьевых давлениях с линией A1, представлен на рис. 2. Там же представлены найденные опытным путем графики производительности некоторых скважин. Опытные графики определяются измерением

расхода на различных ступенях устьевого давления при условии его стабилизации, которая достигается выдерживанием работы на отдельной ступени до суток и более.

Разумеется, в связи с многообразием видов опытных графиков, о совпадении с ними графика типовой скважины говорить некорректно. Отмеченное многообразие вызвано не только отличием конструктивных параметров скважин, но и условиями вскрытия резервуара. Как правило, вскрывается несколько продуктивных зон, имеющих различную мощность (протяженность в скважине) и проницаемость, а также, различную температуру. При испытании таких скважин в зависимости от устьевого давления изменяется не только расход, но и энтальпия флюида, что влияет на гидродинамические параметры течения в стволе скважины и, соответственно, на опытные графики. В таких условиях главным является то, что график типовой скважины отражает усредненные характеристики опытных графиков.

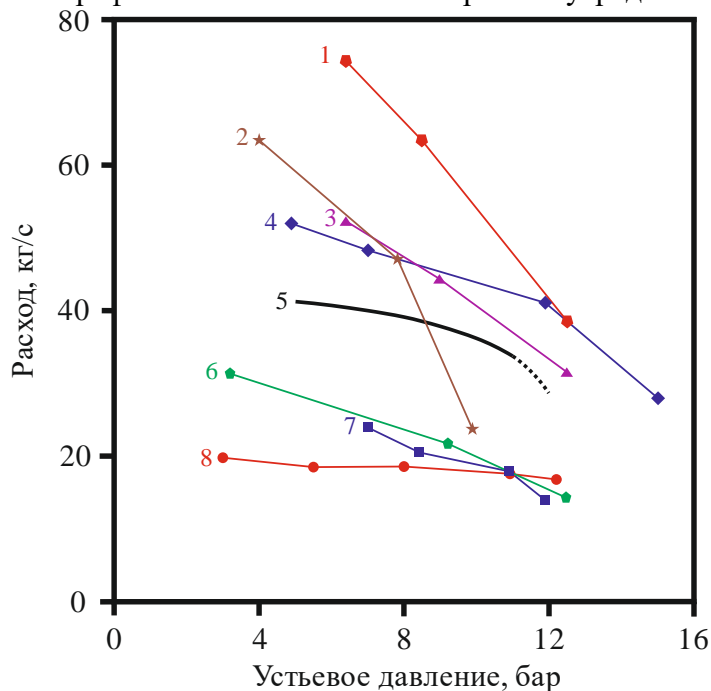


Рисунок 2 – Графики производительности скважин Мутновского месторождения: 1 – скв. Гео-1 (год опробования 2020); 2 – скв. 042 (2020); 3 – скв. Гео-3 (2019); 4 – скв. 029W (2020); 5 – расчет по типовой скважине; 6 – скв. 037 (2019); 7 – скв. А-2 (2010); 8 – скв. А-3 (2016)

Следует обратить внимание, на важные особенности расчетного графика типовой скважины. Во-первых, при давлении ниже 5 бар расход скважины остается неизменным, что указывает на формирование критического потока. Эксплуатировать такую скважину с давлением в системе транспортировки теплоносителя существенно ниже 5 бар не имеет смысла – это не увеличит расход добываемого флюида, но снизит его температуру в соответствии с линией насыщения и, как следствие, его энергетическую ценность. Во-вторых, точки пересечения находятся на восходящей ветви характеристики скважины только до давления 11 бар. Это указывает на то, что при более высоких давлениях скважина не может работать при постоянном, независимом от расхода, устьевом давлении (Шулюпин, 2018), например, при работе на групповой

сепаратор (единный для нескольких скважин, как на Мутновской ГеоЭС-1) с малыми потерями давления в системе транспортировки от скважины до сепаратора. Однако, при испытании скважины с дросселированием потока, оказывающим стабилизирующий эффект, скважина сможет устойчиво работать и при более высоком давлении, на пример 12 бар, но не более 13 бар, поскольку характеристика скважины с этим давлением уже не имеет пересечения с характеристикой притока из резервуара.

Поскольку основная задача добычных скважин на Мутновском месторождении – обеспечение паром работы ГеоЭС, важным показателем производительности является расход добываемого пара. Расход пара связан с расходом добываемого флюида (пароводяной смеси) соотношением

$$G_s = xG, \quad (3)$$

где G_s – массовый расход пара, x – массовое расходное паросодержание, определяемое соотношением

$$x = (h_m - h_w) / (h_s - h_w), \quad (4)$$

где h_m, h_w, h_s – удельные энтальпии смеси, воды и пара.

При энтальпии смеси 1200 кДж/кг и энтальпиях воды и пара, соответствующих давлению 7 бар на линии насыщения, $x = 0,243$. Следовательно, при расходе смеси 40 кг/с расход пара составляет 9,7 кг/с.

Как отмечалось, существенной проблемой на Мутновском месторождения является снижение давления в резервуаре. Если предположить, что параметры, определяющие угловой коэффициент в формуле (2), не изменяются в процессе эксплуатации, допустимое снижение давления (депрессия) в резервуаре будет определяться характеристикой A_2 , параллельной характеристике A_1 и проходящей через точку экстремума характеристики скважины при типовом (рабочем) давлении 7 бар (Рис. 1). В соответствии с рис. 1, предельное давление в резервуаре составляет 45 бар, допустимая депрессия (разность начального и предельного давления в резервуаре) – 25 бар.

Прогноз производительности глубоких скважин

Прогноз производительности вновь построенных скважин при освоении месторождений, аналогичных Мутновскому, имеет вероятностный характер. Бурение даже на уже освоенные глубины не может гарантировать положительный результат – скважина может оказаться принципиально неспособной к добыче флюида по причине отсутствия вскрытия проницаемых зон или слабого притока из резервуара. На различных месторождениях мира имеется множество скважин, вскрывших проницаемые высокотемпературные, но недостаточно продуктивные для устойчивой работы в режиме самоизлива (за счет палифта), зоны (Mubarok and Zarrouk, 2017). На практике при планировании строительства новых скважин используется так называемый «коэффициент удачи», который для месторождений, аналогичных Мутновскому, принимается 0,5, т.е. из двух новых скважин по статистике только одна оказывается продуктивной. Тем не менее, для оказавшихся продуктивными скважин можно выполнить прогноз их производительности, основываясь на средних (типовых) показателях конструкции и характеристики притока флюида из резервуара, как это ранее было выполнено для типовой скважины Мутновского месторождения.

Для планируемых к строительству скважин 3 и 4 км приняты диаметры внутреннего канала, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Параметры внутреннего канала скважин

Глубина скважины, м	Интервал, м	Диаметр, м
3000	0 – 1000	0,302
	1000 – 1900	0,225
	1900 – 3000	0,152
4000	0 – 1200	0,302
	1200 – 2600	0,225
	2600 – 4000	0,152

Предполагается, то питание скважин будет осуществляться через фильтрационные колонны, расположенные в нижних шестистах метрах. При этом диаметр фильтрационных колонн полностью совпадает с аналогичным отрезком типовой скважины, глубиной 2 км. Это позволяет, при отсутствии конкретных данных по проницаемости питающих зон, принять наклон характеристик притока из резервуара единым для скважин 2, 3 и 4 км.

Учитывая конструкцию предполагаемых к строительству скважин, расчетная точка для забойного давления в скважине 3 км принимается глубина 2400 м, для скважины 4 км – 3400 м. Согласно данным математического моделирования на Мутновском месторождении температура 300 °С (что соответствует энтальпии флюида, находящегося в жидком состоянии, 1345 кДж/кг) достигается на глубинах около 2,5 км (Кирюхин, Сугробов, 2019). Это позволяет в качестве расчетных значений для энтальпий флюида принять: для скважины 3 км – 1300 кДж/кг, для скважины 4 км – 1400 кДж/кг.

Принимая давление в резервуаре на границе воронки депрессии на глубине 1400 м равным 70 бар, с учетом зависимости плотности воды от температуры, на расчетных глубинах 2400 и 3400 м имеем давление 141 и 210 бар, соответственно.

Зависимость забойного давления, рассчитанного по программе WELL-4 (Lund, 2016), от расхода при различных устьевых давлениях, принимаемых в пределах построения одного графика постоянными, для скважин, глубиной 3 и 4 км представлена на рис. 3 и 4. Там же представлены характеристики притока флюида из резервуара для текущего значения давления в резервуаре на границе воронки депрессии (линии A1) и при предельном для эксплуатации давлении в резервуаре (линии A2).

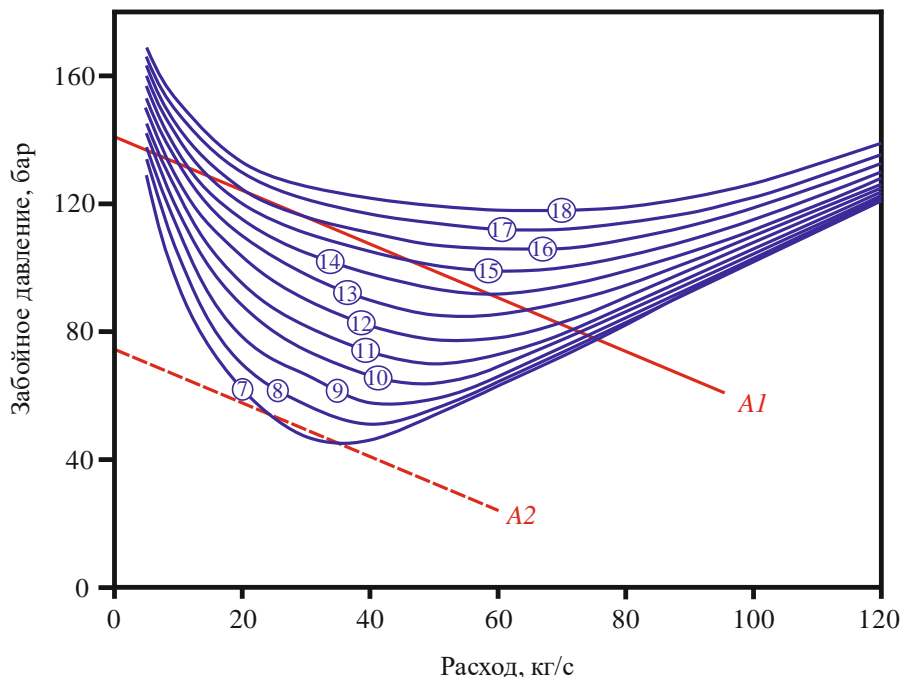


Рисунок 3 – Характеристики скважины 3 км при различных устьевых давлениях (давление в барах указано на линиях), и характеристики притока из резервуара: A1 – для типовых условий, A2 – при предельном для эксплуатации падении давления в резервуаре

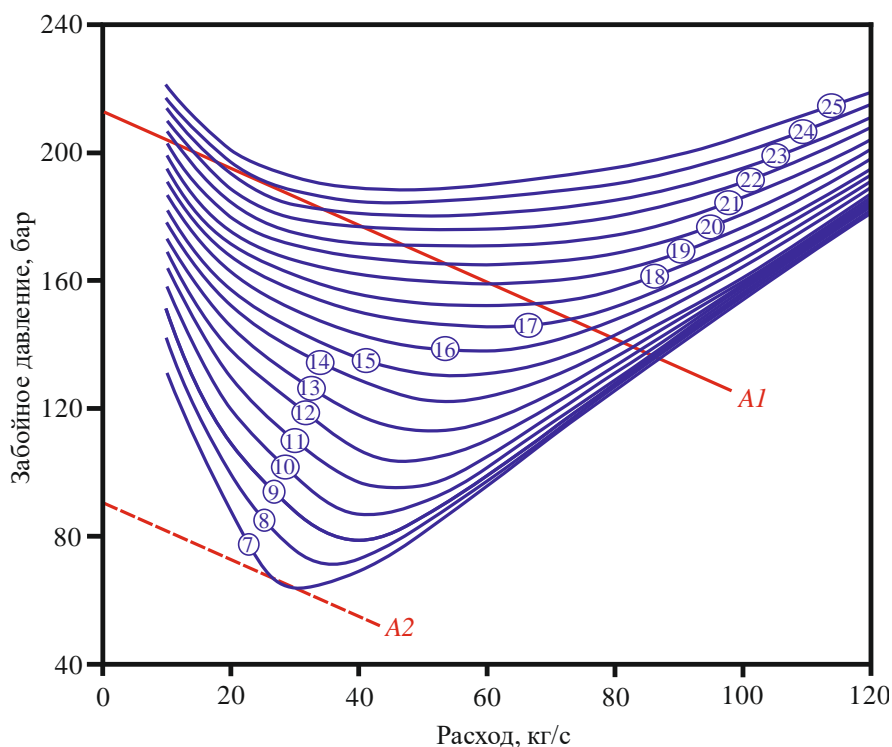
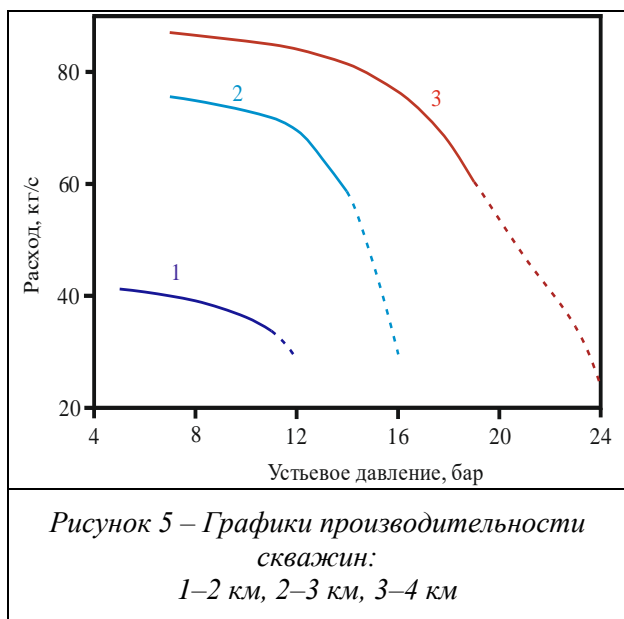


Рисунок 4 – Характеристики скважины 4 км при различных устьевых давлениях (давление в барах указано на линиях), и характеристики притока из резервуара: A1 – для типовых условий, A2 – при предельном для эксплуатации падении давления в резервуаре



Расчетные графики производительности, построенные по точкам пересечения характеристик скважины и характеристиками притока из резервуара (A1) на основании рис. 1, 3 и 4, для скважин глубиной 2, 3 и 4 км представлены на рис. 5. Область графиков производительности, доступная только при наличии стабилизирующего эффекта устьевого давления (например, при испытании скважин с дросселированием потока на устье), представлена пунктирными линиями. Для устьевого давления 7 бар расход флюида (пароводяная смесь) в скважине 3 км составил 75,5 кг/с, в скважине 4 км – 87,0 кг/с. При этом расход пара на устье, рассчитанный по формулам (2) и (3), составил для скважины 3 км – 22,0 кг/с, для скважины 4 км – 29,6 кг/с.

Обсуждение полученных результатов

Назначение добычных скважин на Мутновском месторождении – вывод на поверхность теплоносителя с требуемыми кондициям для обеспечения работы ГеоЭС. Теплоносителем является насыщенный пар. Как показывают результаты расчетов, при строительстве скважин, глубиной 3 и 4 км, и получении положительного результата (с учетом «коэффициента удачи 0,5»), наиболее вероятным будет увеличение расхода добываемого пара, по отношению к типовой скважине 2 км, в 2,3 и 3,1 раза, соответственно.

Учитывая перспективы строительства на Мутновском месторождении бинарной станции, работа которой будет обеспечиваться не только паром, но и водой после сепарации на основной станции, представляет интерес сравнительные характеристики по добываемой смеси: расход увеличиться в 1,9 и 2,2 раза для скважин 3 и 4 км, соответственно.

Учитывая тенденцию к снижению давления в резервуаре в процессе эксплуатации, важнейшим показателем является допустимая депрессия в резервуаре, которая для типовой скважины оценивается 25 бар. Есть основания полагать, что для отдельных скважин, находящихся в настоящее время в эксплуатации, данный показатель уже близок к критическому значению, и именно с этим связывается их периодическое самодавливание. Это позволяет считать данный показатель для Мутновского месторождения наиболее важным.

Положение начальных точек линий A1 и A2 на рис. 3 и 4 (при нулевом расходе) указывает, что для скважин 3 и 4 км этот показатель составляет 66,5 и 119,5 бар. Следовательно, переход к освоению глубоких горизонтов будет способствовать как увеличению срока службы добычных скважин, так и возможности разработки месторождения с пониженным давлением в резервуаре, что даст возможность увеличить общий объем добычи на месторождении.

Прогнозируемые показатели глубоких скважин по отношению к типовой скважине 2 км (т.е. в разах по отношению к типовой скважине) сведены в таблице 2. Там же приведена сравнительная оценка затрат на строительство соответствующих скважин, основанная на данных работы (Beckers and McCabe, 2019).

Таблица 2. Сравнительные характеристики скважин (безразмерные показатели, приведены по отношению к аналогичным величинам для скважины 2 км)

Показатель	скв. 2 км	скв. 3 км	скв. 4 км
Расход пара	1	2,3	3,1
Расход смеси	1	1,9	2,2
Допустимая депрессия	1	2,7	4,8
Затраты на строительство	1	1,6	2,4

Если сравнивать вариант 4 км относительно 3 км, то расход пара (1,3 раз) и расход смеси (1,2 раз) оказываются меньше, а допустимая депрессия (1,8 раз) больше чем увеличение затрат (1,5 раз). Как показывает практика, именно допустимая депрессия в резервуаре оказывается принципиальным показателем при разработке месторождения с добычными скважинами, работающими в режиме парлифта, поскольку с ним связан уровень допустимой добычи на месторождении в целом и возможность добычи в режиме самоизлива за счет парлифта.

Следует отметить, что главной задачей разработки геотермального месторождения является добыча геотермальной энергии. Увеличение глубины освоения месторождения обеспечивает привлечение к тепловому питанию дополнительного объема массива пород, увеличивая энергетический потенциал месторождения. Например, как отмечено в (Дядькин, 1989), при температуре в резервуаре 220 °С основная часть (от 70 до 90 %) геотермальной энергии аккумулировано не во флюидах, а именно во вмещающих породах. То есть геотермальные ресурсы обеспечиваются, как минимум в значительной мере, энергией пород.

Выводы

Результаты проведенного исследования показывают перспективность освоения более глубоких горизонтов Мутновского геотермального месторождения. Это позволит решить проблемы разработки месторождения, связанные со снижением давления в геотермальном резервуаре. При этом ожидается существенное увеличение расхода пара, добываемого одиночной скважиной (в 2,3 и 3,1 раза скважинами 3 и 4 км, соответственно, по сравнению с типовой скважиной 2 км). Также ожидается возможность существенного увеличения объемов добычи геотермальной энергии за счет увеличения допустимой депрессии в резервуаре (в 2,7 и 4,8 раза скважинами 3 и 4 км, соответственно, по сравнению с типовой скважиной 2 км) и привлечения к тепловому питанию дополнительного объема массива пород.

Список литературы

1. *Васянович Ю.А.* Оценка предельного пластового давления для парлифтной добычи флюида на Мутновском геотермальном месторождении / *Ю.А. Васянович, А.Н. Шулюпин, Н. Н. Варламова* // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 30. С. 25–32.
2. *Дрознин В.А.* Физическая модель вулканического процесса / *В.А. Дрознин* М.: Наука, 1980. 92 с.
3. *Дядькин Ю.Д.* Разработка геотермальных месторождений / *Ю.Д. Дядькин* М.: Недра, 1989. 29 с.
4. *Кириухин А.В.* Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения / *А.В. Кириухин, В.М. Сугробов* // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65.
5. *Шулюпин А.Н.* Семейство математических моделей WELL-4 для расчета течений в пароводяных геотермальных скважинах / *А.Н. Шулюпин, А.А. Чермошнцева* // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 7. С. 56–64.
6. *Шулюпин А.Н.* Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов / *А.Н. Шулюпин, Н. Н. Варламова* // Георесурсы. 2020. Т. 22, № 4. С. 113–122.
7. *Шулюпин А.Н.* Устойчивость режима работы пароводяной скважины / *А.Н. Шулюпин* Хабаровск: ООО «Амурпринт», 2018. 136 с.
8. *Bertani R.* Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report / *R. Bertani* // Geothermics. 2016. V. 60. pp. 31–43.
9. *Beckers K.F.* GOPHIRES v2.0: updated geothermal techno-economic simulation tool / *K.F. Beckers, K. McCabe* // Geothermal Energy. 2019. V. 75. P.28.
10. *Hu L.* Characterization of laboratory-scale hydraulic fracturing for EGS / *L. Hu, A. Ghassemi, J. Pritchett, S. Garg* // Geothermics. 2020. V. 83, № 101706. P. 14.
11. *James R.* Factors controlling borehole performance / *R. James* // Geothermics. 1970. V. 2. pp. 1502–1515.

12. *Kayaci N.* Comparative performance analysis of building foundation Ground heat exchanger / *N. Kayaci, H. Demir* // *Geothermics*. 2020. V. 83, № 101710. P.16.
13. *Kumar S.* Optimization of geothermal interaction of a double U-tube borehole heat exchanger for space heating and cooling applications using Taguchi method and utility concept / *S. Kumar, K. Murugesan* // *Geothermics*. 2020. V. 83. № 101723. P.17.
14. *Lund J.W.* Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review / *J.W. Lund, T.L. Boyd* // *Geothermics*. 2016. V. 60. pp. 66–93.
15. *Luo Y.* Integrated analytical modeling of transient heat transfer inside and outside U-tube ground heat exchanger: A new angle from composite-medium method / *Y. Luo, T. Yan, J. Yu* // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 162, № 120373. P. 16.
16. *Moore K.R.* Evaluation of NaCl and MgCl₂ heat exchange fluids in a deep binary geothermal system in a sedimentary halite formation / *K.R. Moore, H.M. Hollander* // *Geothermal Energy*. 2021. V. 9, № 8. P. 23.
17. *Mubarok M.H.* Discharge stimulation of geothermal wells: Overview and analysis / *M.H. Mubarok, S.J. Zarrouk* // *Geothermics*. 2017. V. 70. pp. 17–37.
18. *Templeton D.C.* Induced seismicity during the 2012 Newberry EGS stimulation: Assessment of two advanced earthquake detection techniques at an EGS site / *D.C. Templeton, J. Wang, M.K. Goebel et al.* // *Geothermics*. 2020. V. 83. № 101720. P. 9.
19. *Renaud T.* Numerical simulation of a deep borehole heat exchanger in the Krafla geothermal system / *T. Renaud, P. Verdin, G. Falcone* // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. V. 143, № 118496. P. 11.
20. *Zhang J.* Numerical evaluation of heat extraction for EGS with tree-shaped wells / *J. Zhang, J. Xie, X. Liu* // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. V. 134. pp. 296–310.

CHAPTER VI. CONDITIONS FOR THE FORMATION OF PRODUCTIVE GEOTHERMAL RESERVOIRS AND HYDROCARBON DEPOSITS WITH HARD-TO-RECOVER RESERVES

РАЗДЕЛ VI. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ

УДК 571.51: 551.761: 553.24.065: 550.4:552.578.3

Volcanic rocks of the lower Triassic of the Yenisei-Khatanga regional trough and adjacent territories: manifestation of hydrothermal processes, sources of bitumen

Lyudmila Boldushevskaya

*LLC «RN-KrasnoyarskNIPIneft», Krasnoyarsk,
BoldushevskayaLN@knipi.rosneft.ru*

The microscopic study of hydrothermal mineralization of volcanic and intrusive rocks of the Lower Triassic in the deep wells of the Yenisei-Khatanga regional trough and the adjacent territories of the Taimyr folded area and the Siberian platform are performed. According to the mineral association, it is assumed that hydrothermal processes were manifested in deep conditions as a result of regional settling. There is a filling of the void space of basalt with naphthids, the sources of which are organic matter of more ancient sedimentary rocks. Regional neotectonic uplift, in particular to the conclusion on the surface or for small depths of the Triassic basalt horizons and the destruction of oil. However, in the Yenisei-Khatanga regional trough under the case of Jurassic sediments, the deposits in these horizons could save.

Keywords: Siberian platform, volcanic rocks, hydrothermal mineral formation, bitumens, hydrocarbons biomarkers

Вулканогенные породы нижнего триаса Енисей-Хатангского регионального прогиба и прилегающих территорий: проявления гидротермальных процессов, источники битумов

Л. Н. Болдушевская

ООО «ОН-КрасноярскНИПИнефть»

Выполнено изучение гидротермального минералообразования вулканогенных и интрузивных пород нижнего триаса в глубоких скважинах Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП) и прилегающих территорий Таймырской складчатой области и Сибирской платформы. По минеральной ассоциации предполагается, что гидротермальные процессы проявлялись в глубинных условиях в результате регионального погружения. Отмечается заполнение пустотного пространства базальтов нефтидами, источниками которых является органическое вещество более древних осадочных пород. Региональные неотектонические воздымания привели, в частности к выводу на поверхность или на небольшие глубины триасовых базальтовых горизонтов и разрушение нефтей. Однако в ЕХРП под чехлом юрско-меловых отложений, залежи в этих горизонтах могли сохраниться.

Ключевые слова: Сибирская платформа, вулканогенные породы, гидротермальное минералообразование, битумы, углеводороды-биомаркеры

На севере Сибирской платформы и Таймырской складчатой области развита трапповая формация верхней перми – нижнего триаса, которая представлена покровами вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород с интрузиями преимущественно основного состава.

Формирование позднепалеозойского-раннемезозойского яруса связано с вулканической деятельностью, когда общее поднятие территории обусловило активизацию глубинных разломов. В Тунгусской синеклизе вулканогенные отложения практически не испытали складчатых деформаций и характеризуются пологим залеганием (от 0 до 10 градусов). Локальные отклонения в залегании обусловлены влиянием разрывной тектоники и внедрением интрузий. В пределах Таймырской складчатой области и Енисей-Хатангского прогиба строение пермских и триасовых образований имеет более сложный характер (Рис. 1).

Выполнено макро- и микроскопическое описание вулканогенных, вулканогенно-осадочных пород и интрузивных пород туфолавоваы толщи верхней перми-нижнего триаса в колонковых скважинах на Сырадасайской площади Западного Таймыра и Кыстыхтахской площади севера Тунгусской синеклизы, глубоких скважинах Гольчихинской, Волочанской, Владимирской площадей Енисей-Хатангского регионального прогиба, обнажений массива Кирыка-Тас. В изученных породах отмечаются проявления гидротермальных процессов как в вулканогенных и пирокластических породах (базальтах, туфах, туфоалевролитах, туфопесчаниках), так и в интрузивных (долеритах, долерито-базальтах) (рисунки 2–7).

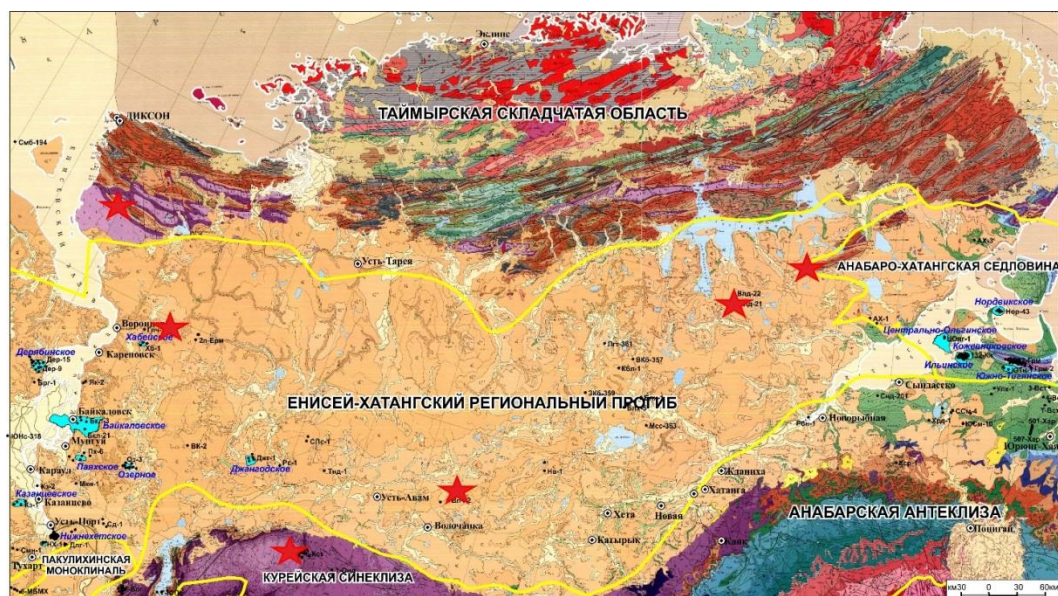


Рисунок 1 – Фрагмент геологической карты Сибирской платформы. Звездочки – места изучения шлифов

Основные процессы это – окварцевание, пропилитизация, карбонатизация, цеолитизация. Согласно исследованиям С.И. Набоко (Набоко, 1963), в кратерах и на склонах современных активных вулканов Камчатки опалитовые и аргиллизированные породы образуются в настоящее время. Среди этих пород имеются разновидности моноопаловые, опало-алунитовые, опало-каолинитовые, кварцево-серицитовые и слабо пропилитизированные. Источником метаморфизма пород в таких условиях являются магмы каналов и корней вулканов. При объемном термальном преобразовании, охватывающем площади в десятки квадратных километров и уходящем на глубину в несколько километров, как в случае Тунгусской синеклизы, под воздействием гидротермальных растворов близ поверхности происходит каолинизация, опалитизация, алунитизация, а глубже –цеолитизация, опализация, фельдшпатизация, окварцевание, серицитизация, карбонатизация и пропилитизация.

По минеральной ассоциации вторичных изменений пород изученной коллекции сделан вывод о том, что изученные породы до предъюрского и неотектонического этапов развития территории находились гипсометрически существенно глубже, что согласуется с данными о поднятиях и размывах в это время (Болдушевская, 2010).

Проявления битумов и нефти отмечались при бурении колонковых скважин в Норильском районе (Баженова Т.К., 1964) на Болгохтонской, Арылахской, Талнахской, Ледянской, Кыстыхтахской площадях северо-запада Тунгусской синеклизы, Сырадасайской площади Западного Таймыра и часто связаны с миндалекаменными зонами базальтовых потоков, в которых миндалины (пустоты, жёды, полости), выполнены кристаллами водно-прозрачного горного хрусталя, кальцита и цеолитов. Нефть бурого до чёрно-бурого цвета маслянистая на ощупь, как правило, с характерным запахом углеводородов. Битум чёрный, пластичный, при ударе издает запах углеводородов. В разрезах структурно-колонковых скважин Кыстыхтахской площади от нижнего – среднего девона вплоть до туфолавовой толщи нижнего триаса в керне обнаружены многочисленные нефте- и битумопроявления в виде капельножидкой и текучей нефти, капель густой нефти и примазок битума.

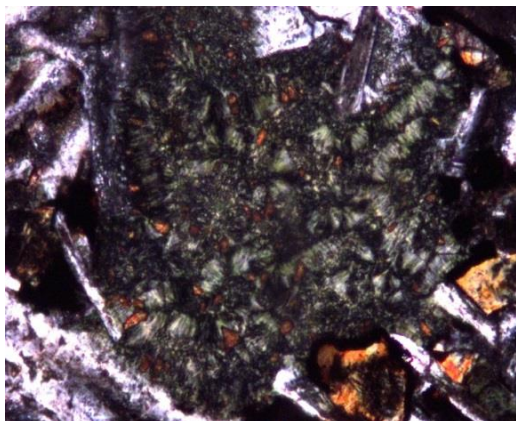


Рисунок 2 – Сква. Волочанская 1, глубина 2551,3 м. Окварцевание в туфо-базальте

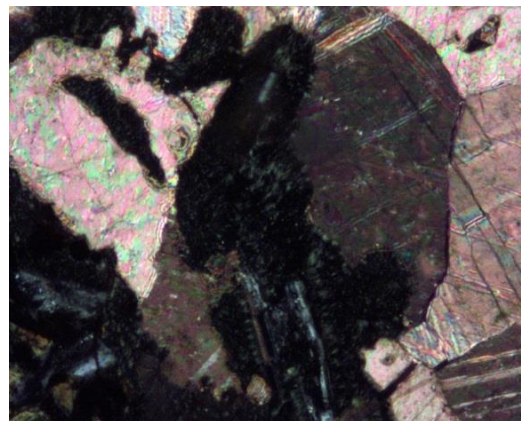


Рисунок 3 – Сква. Волочанская 1, глубина 2553,8 м Карбонатизация в туфо-базальте

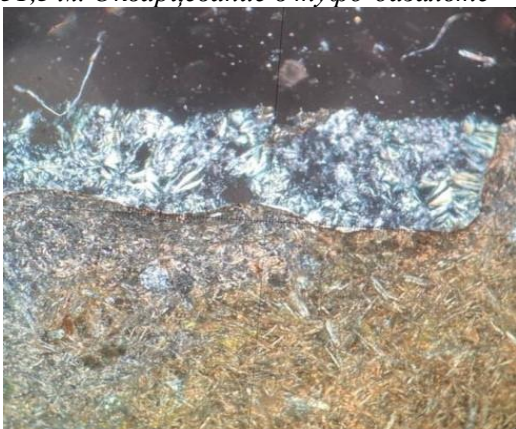


Рисунок 4 – Сква. Гольчихинская 1, глубина 1701 м. Цеолитизация в туфобазальте

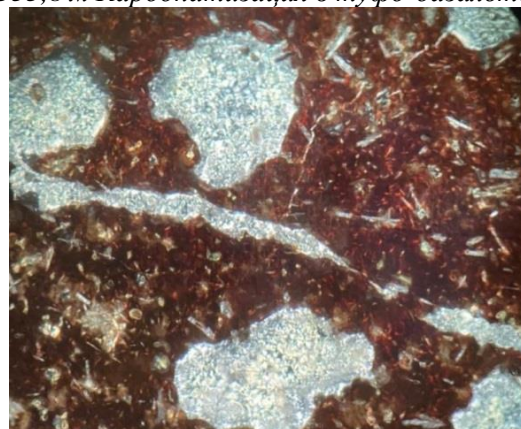


Рисунок 5 – Сква. Гольчихинская 1, глубина 1705 м. Цеолитизация в туфобазальте

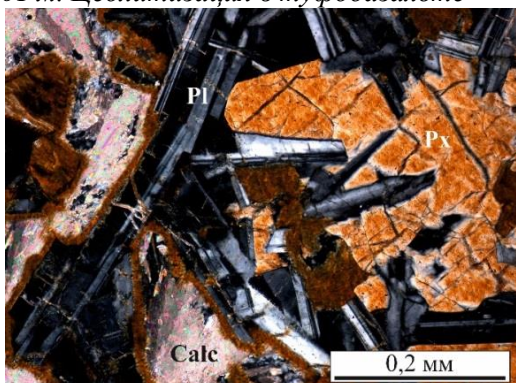


Рисунок 6 – Базальтовый туф бетлинской свиты, обнажение массива Киряка-Тас. Карбонатизация

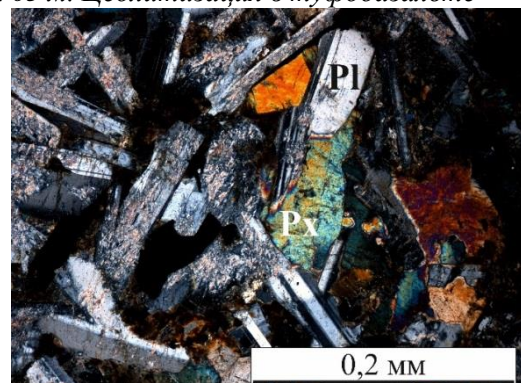


Рисунок 7 – Пропилитизированный долерито-базальт, Обнажение массива Киряка-Тас

Обобщен материал по изучению битумов методами газовой хроматографии и хроматомасс-спектрометрии в триасовых базальтах Западного Таймыра (Сырадасайская площадь) и северо-востока Тунгусской синеклизы (Кыстыхтахская площадь). Для нижнетриасовых нетрадиционных коллекторов в базальтах Западного Таймыра и северного борта ЕХРП источниками генерации УВ установлено органическое вещество (ОВ) палеозойских черносланцевых толщ северной фациальной зоны Западного Таймыра (Болдушевская и др., 2008, 2012). С другой стороны ЕХРП, на севере Тунгусской синеклизы в триасовых базальтах и девонских известняках предполагался такой же источник, как и на Сырадасайской площади, однако результаты анализов показывают, вероятно, смешанное происхождение, предположительно связанное с ОВ верхнерифейских толщ и ОВ юрских толщ Енисей-Хатангского регионального прогиба) ЕХРП, имеющим, преимущественно гумусовый (террагенный) состав. На рисунке 8 показано разный тип распределения трициклических терпанов битумов в этих двух зонах, примыкающих к ЕХРП.

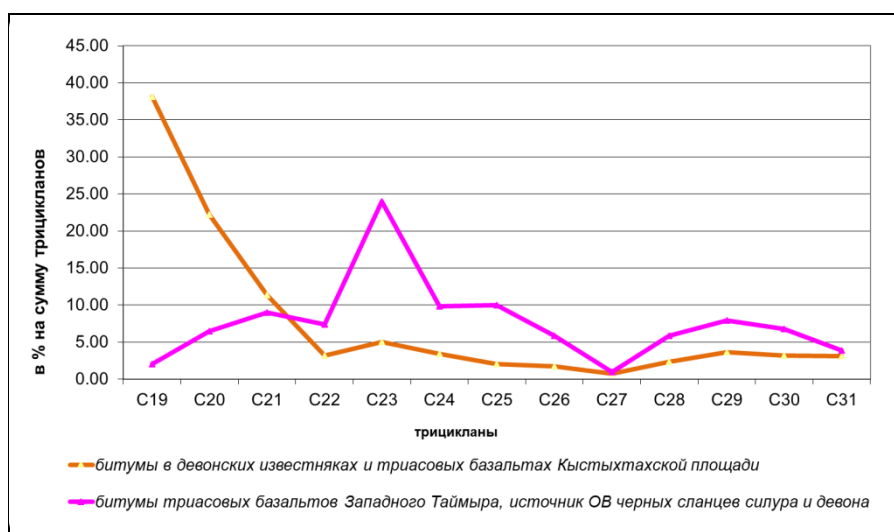


Рисунок 8 – Распределение трициклических терпанов битумов триасовых базальтов Кыстыхтахской площади севера Тунгусской синеклизы и Сырадасайской площади Западного Таймыра

Несмотря на широкое распространение в породах туфолаковой толщи проявлений миграционных нефтидов, возможности формирования на этом уровне промышленных скоплений нефти и газа оцениваются невысоко, что обусловлено остаточным характером нефте- и битумопроявлений в результате, в том числе, неотектонических поднятий на изученных площадях. Региональные неотектонические воздымания привели, в частности к выводу на поверхность или на небольшие глубины триасовых базальтовых горизонтов и разрушение нефтей. Однако в ЕХРП под чехлом юрско-меловых отложений, залежи в этих горизонтах могли сохраниться.

Таким образом, на территории севера Красноярского края имели место гидротермально-метасоматические изменения отложений туфолаковой толщи в результате проработки гидротермальными растворами под действием интрузий в условиях регионального погружения. При этом отмечается заполнение пустотного пространства базальтов нижнего триаса углеводородными флюидами, источниками которых являются более древние осадочные породы, обогащенные органическим веществом.

Список литературы

1. Баженова Т.К. О нефтепроявлениях на Болгохтохской площади (Норильский район) / Т.К.Баженова, А.Н. Гусева, В.Д. Скарятин // Нефтегазовая геология и геофизика. 1964. № 10.
2. Болдушевская Л.Н. Нефтегазоматеринские толщи палеозойского разреза Западного Таймыра и корреляционные связи «органическое вещество пород – нефтиды» /

Л.Н. Болдушевская, Ю.А. Филиппов, С.В. Ладыгин, А.П. Романов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. № 4.

3. Болдушевская Л.Н. Мощности размыва отложений на разных этапах геологической истории Енисей-Хатангского регионального прогиба и северо-востока Западно-Сибирской плиты по данным изучения степени катагенеза органического вещества пород / Л.Н. Болдушевская, Ю.А. Филиппов, А.Н. Фомин // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2010. № 3. С.6.

4. Набоко С.И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях / С.И. Набоко; М.: Изд-во АН СССР, 1963. 172 с.

УДК 553.78(571.66):546.291

Helium isotopes in the spring of Kamchatka

Larisa Lyamina^{1,2}, Natalia Kharitonova^{2,3}

¹Geological institute RAS, Pyzhevsky lane 7, Moscow, 119017, Russian Federation
lyamina-96@list.ru

²Department of Hydrogeology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, Russian Federation

³Far East Geological Institute FEB RAS, prospect 100letya 159, Vladivostok, 690022, Russian Federation

The results of the study of the isotopic composition of helium in the underground fluids of Kamchatka for the last quarter of the XX century are summarized. The results of determining the ratio $^3\text{He}/^4\text{He}$ (R) in 143 gas phase samples taken on the territory of the Kamchatka Peninsula are presented. The values of the isotopic ratio R are in the range from 9×10^{-8} , which is typical for crustal helium, to values corresponding to MORB 1.02×10^{-5} . The purpose of this work is to generalize the data on the ratio of $^3\text{He}/^4\text{He}$ isotopes to obtain the dependences of the distribution of R in the groundwater of the region, to clarify the relationship with the gas component of the fluid.

Keywords: Kamchatka, helium isotopes, gas composition

Изотопы гелия в источниках Камчатки

Л.А. Лямина^{1,2}, Н.А. Харитоновна^{2,3}

¹Геологический Институт РАН, Москва, Россия

²Каф. Гидрогеологии, геологический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия;

Обобщены результаты изучения изотопного состава гелия в подземных флюидах Камчатки за последнюю четверть XX века. Приведены результаты определения отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ (R) в 143 пробах газовой фазы, отобранных на территории полуострова Камчатка. Значения изотопного отношения R лежат в диапазоне от 9×10^{-8} , что характерно для корового гелия, до значений, соответствующих MORB 1.02×10^{-5} . Целью данной работы является обобщение данных по соотношению изотопов $^3\text{He}/^4\text{He}$ для получения зависимостей распределения R в подземных водах региона, выяснение связи с газовой компонентой флюида.

Ключевые слова: Камчатка, изотопы гелия, газовый состав

Введение

Неослабевающий интерес у многих исследователей вызывают зоны перехода континент-океан, особенно в области активных континентальных окраин. Полуостров Камчатка в силу своего положения в северо-западной части Тихоокеанского «огненного кольца» вблизи тройного

сочленения Тихоокеанской, Евразийской и Североамериканской плит вызывает особый интерес, так как является уникальным объектом не только для изучения геодинамических процессов и их направленности, но и с точки зрения гидрогеологии.

Исследуемые флюиды (термальные источники) – благоприятные объекты для региональных исследований состава земного гелия, в отличие от пород и минералов. В подземных флюидах (куда переходит гелий из пород) изотопный состав гелия осредняется и становится квазипостоянной региональной характеристикой исследуемого геоблока (Поляк, 2000).

Объекты и методы исследования

Банк данных по $^3\text{He}/^4\text{He}$ (R) в количестве 143 проб был собран коллективом исследователей при проведении научных изысканий на полуострове Камчатка в период с 1968 по 1994 гг. Все пробы были разделены по газовому составу на три группы: азотные, углекислые и метановые. Внутри каждой группы проводилось более подробное деление на подгруппы по газовому составу.

Среди многообразия термальных вод Камчатки ниже будут рассмотрены термы, локализованные в различных тектонических районах (Геология СССР, 1964): Западно-Камчатская зона (краевой прогиб), Центрально-Камчатская зона, Восточно-Камчатская зона.

При использовании гелия в качестве репера геодинамической обстановки следует обратить внимание на несколько факторов. Во-первых, необходимо учесть поправку R на контаминацию воздухом, то есть определить в пробе содержание атмосферного гелия и ввести в результаты измерений соответствующую поправку. Данная поправка определяется следующим соотношением (Поляк, 2000):

$$R_{\text{испр}} = \{R_{\text{изм}}(^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_{\text{изм}} - R_{\text{атм}}(^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_{\text{атм}}\} / \{(^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_{\text{изм}} - (^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_{\text{атм}}\} \quad (1)$$

Для интерпретации полученных величин R в пункте опробования необходимо выяснить устойчивость во времени. Если она меняется, что вполне вероятно в такой активной геодинамической системе как Камчатка, то региональные различия могут быть неправдоподобными. Выполнение режимных наблюдений в каждом пункте – это нереальная вещь. Но в течение 20 лет проводились неоднократные опробования в некоторых пунктах, что показало устойчивость R, то есть отсутствие вариаций изотопно-гелиевого отношения практически в каждом из пунктов опробования. Таким образом, имеющиеся данные подтверждают правомерность использования полученных результатов для рассуждений о региональных закономерностях значений R (Рис. 1).

Также следует выяснить изменчивость R в вертикальном разрезе районов опробования. Это общее условие объективного анализа латеральных вариаций величин любого химического/геофизического параметра, приписываемых конкретным пунктам. Реализовать данную задумку было возможно только в разбуренных областях. К таким районам относятся Тюшевский наложенный прогиб, где велись поиски на нефть – Богаческая площадь, Наложенный Вулканический пояс (например, Паужетка, Паратунка) и Западно-Камчатская зона. В принципе можно констатировать, что в разбуренных регионах систематических различий по R в вертикальном разрезе не наблюдается.

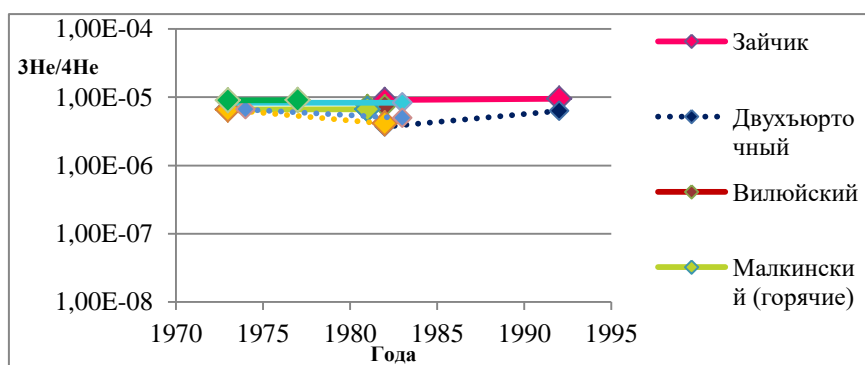
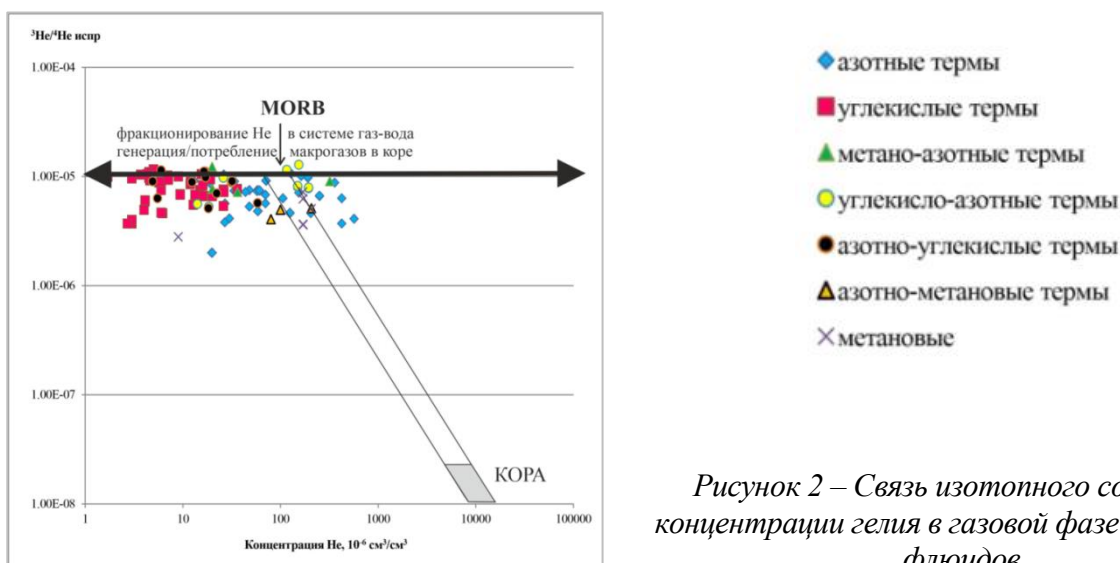


Рисунок 1 – Изменение соотношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ во времени

Результаты исследования и обсуждение

В исследуемых термальных источниках изотопный состав гелия и его концентрации достаточно разнообразны. Значения R лежат в достаточно широком диапазоне, охватывая три порядка величины: от $R = 9 \times 10^{-8}$ в скважинах (основной компонент газовой фазы – метан) на Усть-Кисунской нефтегазовой площади до $R = 1,02 \times 10^{-5}$ – углекислый источник, располагающийся в южном секторе кальдеры вулкана Узон.

Столь же изменчива в газах района исследования и концентрация гелия. Можно выделить две группы точек: углекислые пробы с самыми высокими значениями R и небольшими концентрациями He ($10^{-6} \text{ см}^3/\text{см}^3$) от 3 до $26,3 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{см}^3$ и азотные источники с концентрациями He ($10^{-6} \text{ см}^3/\text{см}^3$) до $568 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{см}^3$ (Рис. 2). Некоторый разброс точек по вертикали отражает смешение мантийного и корового гелия. А вот касаясь дисперсии точек по горизонтали, то на это могут быть две причины: во-первых, фракционирование гелия и других газов в системе газ-вода из-за разной растворимости; во-вторых, изменение концентраций главных химически активных компонентов газовой фазы.



С помощью сопоставления изотопного состава гелия с его концентрацией в разных газогеохимических типах флюидов была проведена попытка уточнить условия их формирования. Азотные термы располагаются в трех зонах: Срединный вулканический пояс, Восточный вулканический пояс, Кроноцкий террейн. Согласно расчетам по методике (Y. Sano и H. Wakita, 1984) получается, что доля мантийного гелия колеблется от 40 % до 94 % в пробах из Восточного вулканического пояса, в пробах, отнесенных к Срединному хребту, от 42 % до 98 %, а для Кроноцкого террейна характерно присутствие коровой компоненты (до 55 %), а мантийная имеет подчиненное значение. К сожалению, по азотным термам нет данных по $\delta^{15}N$, который помог бы на прямую определить генезис N_2 в термальных водах разных провинций. Данный вопрос на данный момент является открытым и, с нашей точки зрения, весьма актуальным, так как используемый ранее N_2/Ar -коэффициент – это косвенный метод определения происхождения азота.

Углекислые термы располагаются только в пределах наложенного Восточного вулканического пояса. Следует отметить, что пробы, относящиеся к Южно-Камчатскому антиклинорию имеют долю мантийного гелия меньше (от 55 % до 90 %, например, Мутновское геотермальное поле), в то время как на территории Восточно-Камчатского прогиба доля мантийной компоненты колеблется от 70 % до 98 % (кальдера вулкана Узон).

Метановые термы сосредоточены на территории Большерецкой впадины, наложенного Тюшевского прогиба, также есть пробы, относящиеся к Восточно-Камчатскому антиклинорию. Для данных проб максимальная доля мантийного гелия достигает не более 46 % для Восточно-Камчатского антиклинория, а для Большерецкой впадиной с наложенным Восточным вулканическим поясом максимально достигает 67 %.

Благодаря данным по изотопии $\delta^{13}\text{C}$ удалось подтвердить генезис формирования газового состава для метановых и углекислых источников, который укладывается в гелиевую систематику. В случае углекислых и метановых терм происходит генерация основного компонента газовой фазы – углекислоты/метана, но источник их формирования может отличаться в зависимости от геодинамической обстановки. Для подземных вод (основной компонент газовой фазы – метан), связанных с прогибами (например, Западно-Камчатский прогиб) $\delta^{13}\text{C}$ находится в диапазоне от $-51,4\text{‰}$ до $61,8\text{‰}$, что соответствует углероду биохимического происхождения. Если же пробы были взяты из районов с Восточным наложенным вулканическим поясом, то значения $\delta^{13}\text{C}$ находятся в диапазоне от $-21,4\text{‰}$ до $-38,2\text{‰}$, что отвечает углероду мантийных газов. Генезис углекислоты углекислых проб определяется поступлением глубинных мантийных газов: $-8\text{‰} < \delta^{13}\text{C} < -4\text{‰}$.

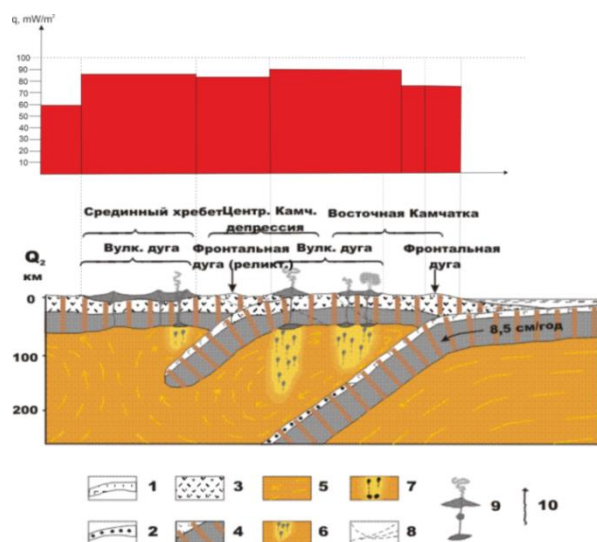


Рисунок 3 – Вариации теплового потока в поперечном сечении Камчатки.

Обозначения:

- 1 – Океаническая кора;
- 2 – эклогиты;
- 3 – континентальная кора;
- 4 – литосфера;
- 5 – стеносфера;
- 6 – зоны магмообразования в мантийном клине;
- 7 – зоны выплавления и подъема магм внутриплитного геохимического типа;
- 8 – разломы и зоны разломов;
- 9 – вулканы и вулканические комплексы островодужного типа с подводными каналами и магматическими очагами;
- 10 – подводные каналы и вулканы внутриплитного геохимического типа

Список литературы

1. Геология СССР: Т.31., Ч.1 Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание М.-Л.: Недра, 1964. 734 с.
2. Поляк Б.Г. Изотопный состав гелия и тепловой поток – геохимический и геофизический аспекты тектогенеза / Б.Г. Поляк, И.Н. Толстихин, Якуцени В.П // Геотектоника. 1979. № 5. С. 3–23.
3. Поляк Б.Г. Изотопы гелия в подземных флюидах Байкальского рифта и его обрамления (к геодинамике континентального рифтогенеза) / Б.Г. Поляк // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2, № 2. С. 1–21.
4. Sano, Y. Geographical distribution of $3\text{He}/4\text{He}$ ratios in Japan: implications for arc tectonics and incipient magmatism. / Y. Sano, H. Wakita // Journal of Geophys. Res. Solid Earth. 1985. 90 (B10). 8729–8742. DOI: 10.1029/JB090iB10p08729.

Application of the double porosity scheme for the analysis of the history plot of the water-methane field

Ainur Bayramova

*Saint Petersburg State University, Institute of Earth sciences, Saint Petersburg, Russia
aynurbayramova1610@mail.ru*

The analysis of the history of operation for the double porosity scheme of the water-methane field is performed. The conceptual hydrodynamic model of the reservoir. To analyze the operation of a single vertical well using the PetraSim graphical interface, the base TOUGH2-EWASG model has been prepared.

Keywords: PetraSim, modeling, double porosity, TOUGH2, EWASG

Применение схемы двойной пористости для анализа истории эксплуатации водно-метанового месторождения

А.С. Байрамова

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт Наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

Выполнен анализ истории эксплуатации для схемы двойной пористости водно-метанового месторождения. Обоснована концептуальная гидродинамическая модель резервуара. Для анализа эксплуатации одиночной вертикальной скважины с использованием графического интерфейса PetraSim подготовлена базовая TOUGH2-EWASG модель.

Ключевые слова: PetraSim, моделирование, двойная пористость, TOUGH2, EWASG

Концептуальная модель

На модели рассматриваются варианты эксплуатации субгоризонтального продуктивного резервуара мощностью 17 м внутри толщи с общей мощностью 50 м. Внешний радиус (R) 2573 м, сетка нерегулярная, фактор сетки (f) 1,07882 и по вертикали выбрано (NZ) 50 элементов. Тип коллектора: гранулярно-кавернозно-трещинный, карбонатный. Указанная ситуация геометрически может соответствовать эксплуатации одиночной добычной скважины трехслойного резервуара в условиях радиально-цилиндрического потока (Рис. 1). Цилиндр неоднородный, внутри резервуара есть более проницаемые, продуктивные, субгоризонтальные зоны и непроницаемые зоны. Поэтому при создании модели мы применяем схему с двойной пористостью.

Модуль состояния

Резервуар насыщен трехкомпонентной системой, т.е. газ с преобладанием метана (CH₄) и жидкая фаза воды с раствором хлорида натрия (NaCl). Можно сделать вывод, что на данном этапе можно использовать модуль состояния EWASG.

Модуль состояния флюида EWASG (**W**ater-**S**alt-**G**as) разработан для моделирования резервуаров, насыщенных минерализованными флюидами и неконденсирующимися газами (NCG). EWASG описывает водный флюид с переменной минерализацией как смесь воды и NaCl. Это позволяет использовать константы растворимости, зависящие от температуры, а также учитывать солеотложение. EWASG представляет компоненты активной системы (вода, NaCl, NCG) как трехфазную смесь. NaCl в твердой фазе является единственной минеральной фазой, рассматривается аналогично другим фазам (водной и газовой), за исключением того, что она является иммобилизованной фазой (ее относительная проницаемость определена равной нулю).

Вычислительная сетка

Поскольку исходные данные включают историю эксплуатации по трем скважинам, для анализа работы скважины наиболее подходит оси симметричная модель с учетом геометрии резервуаров. Поэтому мы для моделирования используем RZ вычислительную сетку. Ее параметры по вертикали (Z) 1 элемент модели, по радиальному направлению (R) это регулярная

сетка 50 элементами модели и с фактором (f) 1,07882. При генерации вычислительной сетки мы также применяем опцию MINC двойной пористости (Double porosity) (Рис. 2) с параметрами: Fracture Spacing (расстояние между трещинами) 25 м, потому что у нас 2 трещины на 50 м резервуара.

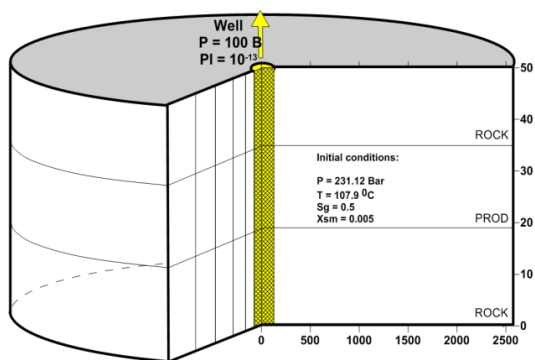


Рисунок 1 – Концептуальная модель продуктивного субгоризонтального резервуара (PROD) внутри массива вмещающих пород (ROCK)

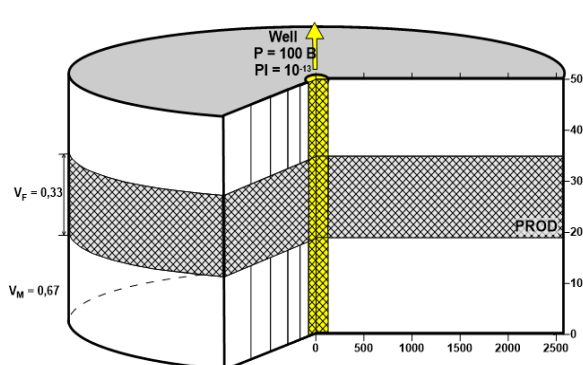


Рисунок 2 – Определение двойной пористости

Таблица 1. Основные параметры модели

Параметр	Значения	Размерность
Параметры двойной пористости		
Ориентация трещин	3D, 1D	
Средняя расстояние между трещинами	10	m
Доля трещинного пространства	0.33	
Количество взаимодействующих континуумов	4: 0.16, 0.17, 0.17, 0.17	
Параметры трещинного пространства		
Минеральная плотность	2600	kg/m ³
Пористость	0.5	
k _f , Проницаемость по направлениям: X, Y, Z	1E-13	m ²
Теплопроводность	2.1	W/m-C
Удельная теплоемкость	1000	J/kg-C
Относительная проницаемость	Grant's Curves (SLR = 0.3, SGR = 0.05)	
Функция капиллярного давления	Не учитываются	
Сжимаемость	0	1/Pa
Параметры для матрикса		
Минеральная плотность	2350	kg/m ³
Пористость	0.2	
k _m , Проницаемость по направлениям: X, Y, Z	6E-14	m ²
Теплопроводность	2	W/m-C
Удельная теплоемкость	1000	J/kg-C
Относительная проницаемость	Grant's Curves (SLR = 0.3, SGR = 0.05)	
Функция капиллярного давления	Не учитываются	
Сжимаемость	1E-5	1/Pa
Начальные условия		
Давление	2,3112E7	Pa
Sg, Насыщение газовой фазы	0.5	
Температура	107.9	C
Массовая доля NaCl	0.005	

Исток – скважина. Задано $Q(t)$ – расход скважины, зависящий от времени. Из истории эксплуатации взят суммарный расход и задано как Mass sink. Q -расход скважин.

Таблица 2. Варианты моделирования историй эксплуатаций месторождения

Вариант моделирования	Добычная скважина	k_m	k_f	S_g
Dp#1	$Q = \text{констант}$	$1E-13$	$1E-9$	0.5
Dp#2	$PI = 1E-13 \text{ m}^3$ $P_b = 1E7 \text{ Pa}$	$6E-14$	$1E-12$	0.5
Dp#3	$Q(t)$	$6E-14$	$1E-13$	0.5
Dp#4	$Q(t)$	$6E-14$	$1E-13$	0.4
Dp#5	$Q(t)$	$6E-14$	$1E-13$	0.45
Dp#6	$Q(t)$	$6E-14$	$1E-13$	0.43
Dp#7	$Q(t)$	$6E-14$	$1E-13$	0.44

Параметры прогона модели – дискретна. Максимальный шаг по времени (ΔT) 1 день. Время соответствует включению и выключению скважины.

Интерполяция граничных условий (Boundary Conditions Interpolation) выбрано Rigorous step. Она будет аппроксимировать изменение расхода скважины как в табличной времени.

Анализ полученных при прогоне модели результатов

Результаты моделирования истории эксплуатации показаны на рис. 3. Рисунок показывает сопоставимые результаты моделирования с историей эксплуатации.

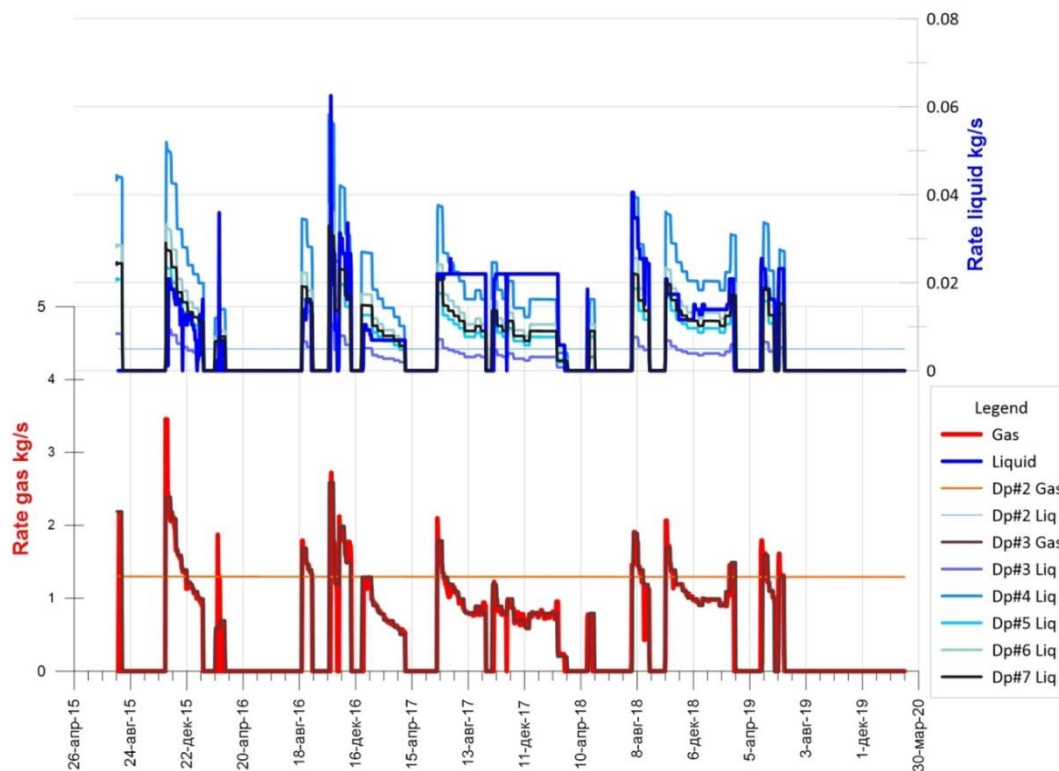


Рисунок 3 – Графики с результатами моделирования истории эксплуатации водно-метанового месторождения

Измерения содержаний дейтерия и кислорода-18 выполнены в РЦ РДМИ Научного парка СПбГУ, производились на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L2120-i в режиме высокой производительности. В качестве стандартов использовались V-SMOW2, GISP, SLAP, USGS-45 USGS-46. Ошибка измерений составляла $\pm 0,1 \%$ по $\delta 18O$ и $\pm 1 \%$ по $\delta 2H$. Результаты измерений приведены относительно SMOW. Автор выражает благодарность Кирюхину А. В. за консультации по численному моделированию.

Список литературы

1. *Кирюхин В.А.* Региональная гидрогеология. СПб: СПГГУ, 2005. 344 с.
2. *Кирюхин П. А., Кирюхин А. В.* Frac–Digger. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612168 от 21.06.2016.
3. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А.В. Кирюхин* // СПб.: Эко-Вектор, 2020. 431 с.
4. PetraSim resources. PetraSim official web-site :сайт ThunderHeadeng Engineering [Электронный ресурс]. 2021. URL: <http://www.thunderheadeng.com/petrasim/petrasim-resources/> (дата обращения: 02.08.2021).
5. *Pruess K.* A practical method for modeling fluid and heat flow in fractured porous media / *К. Pruess, Т. N. Narasimhan* // Society of Petroleum Engineers Journal 1985. № 25. pp. 14–26.

УДК 553.9:551.1/4

Role of tectonics and subsurface fluid dynamics in formation of oil and gas productive deposits of Upper Paleozoic and Jurassic complexes of West Siberia

Tatiana Korovina, E. A. Romanov, Ekaterina Kropotova

*«Coretest Service, Ltd.», Tyumen, Russia
korovina_ta@coretest.ru*

A broad involvement in exploration and development of Jurassic deposits as well as overgrowth of works on study of the Pre-Jurassic complex of productive deposits in West Siberia showed a significant and sometimes a crucial role of tectonics and subsurface fluids in formation of oil reservoirs and pools. The results of the laboratory study of rocks, formation waters composition, dissolved and free mineral gases, phase and component compositions of the hydrocarbons themselves enable to estimate a degree of subsurface processes effect on the bottom floors of the sedimentary cover. The rising inheritance is observed of the tectonics influence and related vapor-gas injections of deep sources in the productive deposits of the Bazhanian suite: occurrence of paleotemperatures over the area similarly to the parameters in the Pre-Jurassic volcanogenic-sedimentary complex by the core from wells exposed both horizons. There observed the abnormal for the West Siberia growth of barium ions in the formation waters of the Lower-Middle-Jurassic beds (by 1–2 order more than of the overlying beds). In the zones of neotectonic activization the breakthroughs of carbon dioxide are fixed up to the Cretaceous deposits with desalinification on separate areas in the water saturated zones of the productive beds (a change of the waters type and reduction of salinity by 1,3–1,5 times). In the north of the West Siberia in the geodynamically active marginal framing of the East-Siberian plate and Taimyr in the Neocomian deposits the zeolitization of reservoirs is widely spread (up to three hydrothermal injections in the large and largest oilfields in Nadym-Purovsk and Purovsk-Tazovski districts).

In the paper the results of the laboratory study of rocks and fluids and their systematization.

Keywords: tectonodynamic processes, bazhanian suite, gas hydrates, carbonation, zeolites, lomontite

Роль тектоники и глубинной флюидодинамики в формировании нефтегазопродуктивных отложений верхнепалеозойского и юрского комплексов Западной Сибири

Т.А. Коровина, Е.А. Романов, Е.П. Кропотова

ООО «Корэст сервис», г.Тюмень, Россия

Широкое вовлечение в разведку и разработку юрских отложений, а также наращивание работ по изучению доюрского комплекса продуктивных отложений в Западной Сибири показали значительную, а иногда и решающую роль тектоники и глубинных флюидов в формировании коллекторов и залежей нефти. Результаты лабораторного изучения горных пород, состава пластовых вод, растворенных и свободных минеральных газов, фазовый и компонентный составы самих углеводородов позволяют оценить степень воздействия глубинных процессов на нижние этажи осадочного чехла. Наблюдается восходящая унаследованность влияния тектоники и связанных с ней парогазовых инъекций глубинных источников в продуктивных отложениях баженовской свиты: распространение палеотемператур по площади аналогично параметрам в доюрском вулканогенно-осадочном комплексе по керну скважин, вскрывших оба горизонта. Наблюдается аномальный для Западной Сибири рост содержания ионов бария в пластовых водах ниже-среднеюрских пластов (на 1–2 порядка больше выше лежащих). В зонах неотектонической (современной (?)) активизации прорывы углекислого газа фиксируются вплоть до меловых отложений с опреснением на отдельных участках в водонасыщенных зонах продуктивных пластов (смена типа вод и снижение минерализации в 1,3–1,5 раза). На севере Западной Сибири в геодинамически активном окраинном обрамлении Восточно-Сибирской плиты и Таймыра в отложениях неокома широко распространена цеолитизация коллекторов (до трех гидротермальных инъекций на крупных и крупнейших месторождениях в Надым-Пуровском и Пуровско-Тазовском районах).

В докладе приводятся результаты лабораторных исследований пород и флюидов и их систематизации.

Ключевые слова: тектонодинамические процессы, баженовская свита, газогидраты, карбонатизация, цеолиты, ломонтит

Масштабность нефтегазоносности меловых отложений осадочного чехла Западной Сибири широко известна. Концептуально многие десятилетия геолого-разведочные работы здесь велись в рамках флюидно-миграционной парадигмы, сформулированной Н.Б.Вассоевичем, и роль тектонических процессов практически игнорировалась. Это привело к тому, что разведывались преимущественно ловушки антиклинального типа (Карпов, 2012). В последние десятилетия активные работы по изучению юрских отложений и подстилающих отложений доюрского переходного структурного этажа (ПСЭ) привели к пониманию важности тектонодинамических процессов как в формировании ловушек неантиклинального типа, так и механизмов образования залежей углеводородов (УВ) вплоть до их источников. Назрела необходимость выработки новой концепции нефтегазоносности глубоководных отложений, вплоть до пересмотра ряда позиций, касающихся и осадочного чехла в целом.

К сожалению, вскрытие доюрского фундамента носит несистемный характер, открытие здесь месторождений (даже крупных!) в вулканогенных и карбонатных породах зачастую является случайным фактором, а попытки разработки системных прогнозных критериев нефтегазоносности этих отложений пока к успеху не привели. Пожалуй, наиболее актуальными в настоящее время являются результаты исследований керна и пластовых флюидов, количество которых уже весьма представительное, а в некоторых компаниях, которые активно разрабатывают открытые в тектонически обусловленных формациях месторождения, эти исследования ведутся уже целенаправленно.

По результатам наблюдений влияние тектонических факторов регистрируется повсеместно, уже начиная с отложений верхней юры, к которым принадлежит баженовская свита (Коровина, 2004). Так степень катагенетической зрелости керогена, являющегося индикатором всех процессов, сопровождающих формирование её продуктивности, коррелируется с термодинамическими параметрами в доюрском фундаменте, представленном на исследованном полигоне Красноленинского свода: повышение катагенетической зрелости баженовского керогена (T_{max} 431–446 °C) в одних и тех же скважинах, вскрывших оба объекта, сопровождается ростом палеотемператур (≈ 280 – 330 °C соответственно) в вулканогенно-осадочном комплексе в пределах одного многопластового месторождения. Формирование собственных залежей в баженовской свите в полной мере контролируется структурой тектонических напряжений битуминизированной упруго-пластичной формации, гасящей до 80% тектонических разломов разной глубины заложения

(Коровина, 2021). Кроме того, в керне были обнаружены следы газогидратов смешанного метаново(?) -углекислотного состава.

В региональном же плане наиболее существенными из-за массовости и широты охвата территории являются результаты изучения ниже-среднеюрских отложений. Это повсеместная и масштабная работа по разведке и освоению ресурсов значительного по мощности стратиграфического этажа на всей территории Западной Сибири. В контексте рассматриваемого вопроса это крайне важные исследования, поскольку в части, например, пластовых флюидов они выполняют роль флюидодинамических индикаторов глубинных процессов и степени их влияния на удаленный от источников осадочный чехол. Обращает на себя внимание прежде всего распространенное масштабное явление смены типа пластовой воды с хлоридно-натрового на гидрокарбонатно-натриевый с одновременным опреснением. Так в пределах крупных залежей горизонта ЮС₂ на Сургутском своде минерализация понижается с 32–36 г/л до 22–24 г/л. Локализация зон опреснения контролируется преимущественно зонами трещиноватости вокруг дизъюнктивных нарушений. Кроме того, аналогичное явление наблюдается в нижнемеловых отложениях неокома и ачимовской толщи в пределах территории Среднего Приобья с более значительной степенью опреснения (от 15–17 до 5–7 г/л) вдоль регионального разломов (например, меридианального простирания – восточный борт Фроловской впадины). Очевидно, что данные флюидодинамические процессы имеют не только отдаленную «историю», но относятся к весьма недавним неотектоническим событиям, поскольку наблюдаются в пределах водонасыщенной зоны одного и того же пласта с параметрами коллекторов: K_n – 18–22 %, $K_{пр}$ – до $2-5 \times 10^{-3}$ мкм². То есть тип минерализации и её состав не успели выровняться. Масштабные исследования пластовых вод показали также существенное нарастание содержания ионов бария, в сравнении с фоновым составом неокомских пластовых вод – с 20–35 мг/л оно возрастает в юре в отдельных скважинах до 280–360 мг/л. Если для вышележащих надбаженевских отложений содержание ионов бария в пластовой воде имеет тенденцию сингенетичности составу пород, то в юрских отложениях она исчезает полностью. Кроме того, по данным гамма-спектрометрических исследований керна для песчано-алевролитовых пород характерно присутствие радиоактивных изотопов бария в карбонатной составляющей цемента и псевдоморфоз по терригенной матрице.

Следует отметить, что гидротермальные эманации влияют не только на состав пластовых вод – повышенное содержание углекислого и других газов отражаются в реологии нефтей, понижая в зонах таких инъекций содержание растворенных газов (газовый фактор) и плотность.

На севере Западной Сибири юрские отложения системно исследованы фрагментарно вследствие глубокого погружения, делающего практическое освоение нерентабельным. Однако влияние тектонически обусловленных флюидодинамических процессов здесь наблюдается уже в меловых отложениях. В этой связи наиболее показательна цеолитизация нефтегазовых коллекторов. Это явление распространено на значительной территории, ограниченной: на востоке границей Западно-Сибирской НГП, на западе Уренгойским НГР, на севере Надым-Пуровским НГР, на юге Аганским НГР. Наибольшее развитие процесса цеолитизации наблюдается на северо-востоке в Надым-Пуровском, Пуровско-Тазовском междуречьях на территории, близко примыкающей к зоне с наиболее активными геодинамическими процессами при формировании фундамента платформы (Енисей-Хаттангский прогиб). Характер цеолитизации коллекторов свидетельствует о вторичном минералообразовании в результате вторжения гидротермальных растворов, охватывающего наиболее проницаемые участки первичного коллектора до формирования углеводородных залежей (Сахибгареев, 1989). В зоне максимального развития насчитывается до трех активизаций в толще песчано-алевролитовых пород толщиной десятки метров с промежутками бесцеолитовых отложений (включая песчано-алевролитовые) толщиной до 200 метров. Далее залежи формировались как в цеолитизированных, так и в нецеолитизированных породах. К югу и юго-западу интенсивность процесса снижается –

число проявлений не превышает одного, а толщина цеолитизированных интервалов на периферии территории снижается до первых метров.

Тектонические процессы по данным изучения керна и флюидов являются неотъемлемой составляющей формирования и самих залежей. Ограниченность изученности изотопных составов углеводородных газов не позволяет однозначно толковать природу газовых залежей с этой точки зрения – они недостаточно представительны и системны. Но в отношении нефтей картина более представительная, благодаря широкому внедрению современных экспрессных методов анализа химического состава пород и металлов в нефтях рентгенофлуоресцентными методами. Многолетняя работа авторов по изучению нефтеносности доюрского вулканогенного комплекса на Красноленинском своде показало, что в составе нефтей отсутствует ванадий, который относится к минеральным индикаторам их биогенности. По этому признаку эти нефти в 100 % случаев исследования (более полутора тысяч проб) относятся к безванадиевым, что само по себе неудивительно, поскольку кроме этого для данного объекта характерны и другие особенности, не оставляющие сомнения в глубинном характере флюидодинамических процессов: водородная дегазация, характер битуминизации в зонах метаморфизма и метасоматоза пород в зависимости от палеотемператур и другие. Но поскольку месторождение относится к многопластовым, то исследования залежей в пласте ЮКо (баженовская свита верхне-юрского возраста), пластах горизонта ЮК₂₋₅ средне-юрского возраста также показало отсутствие ванадия в нефтях единичных скважин на фоне его нормального содержания, характеризующего их биогенность, в залежи в целом. В последние годы в геологической литературе публикуются результаты аналогичных исследований по другим месторождениям Западной Сибири. По этим данным распространенность подобного явления охватывает практически весь осадочный чехол и для Западной Сибири является повсеместным для нефтяных месторождений и нефтегазовых с нефтяными оторочками.

Таким образом, несмотря на то, что тектоническая и геодинамическая парадигма Западной Сибири ещё только формируется, объективные результаты исследования пород и флюидов как первичных носителей геологической информации не только обосновывают некоторые тектонические механизмы, но и в значительной мере уже могут свидетельствовать об их пространственном и хронологическом распространении в региональном масштабе провинции и её отдельных нефтегазоносных областей и районов.

Список литературы

1. *Карпов В.А.* Состояние и перспективы развития нефтегазопоисковых работ в Западной Сибири / *В.А. Карпов* // Геология нефти и газа. 2012. № 3. С. 2–6.
2. *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 / *Т.А. Коровина*; рук. Работы *В.В. Шиманский*; ВНИГРИ. СПб: ВНИГРИ, 2004. 27 с.
3. *Коровина Т.А.* О природе нефтегазоносности баженовской свиты и механизмах формирования коллекторов и залежей в ней / *Т.А. Коровина, Е.П. Кропотова, Е.А. Романов* // Петрофизика. EAGE. 2021. Том 4. (в печати)
4. *Лебедев Б.А.* Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах / *Б.А. Лебедев* // Л.: Недра, 1992. 239 с.
5. *Сахибгареев Р.С.* Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей / *Р.С. Сахибгареев* // Л.: Недра, 1989. С. 258.

Thermohydrodynamic modeling of the conditions for the formation of the hydrothermal system in the southwestern sector of the Koryaksky volcano

Pavel Voronin, Alexey Kiryukhin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
Malgor90@mail.ru*

Performed modeling of the conditions for the formation of the Ketkin hydrothermal system, taking into account the possible Koryak-Ketkin magma-hydrothermal relationship. Based on the simulation results, it has been established that the source of heat supply can be magma injections in the form of sills and dikes in the depth range from –6 to –3 km abs. in the southwestern sector of the Koryaksky volcano and the convective heat flow from the host rocks, while the water supply, judging by the isotopic composition of the water, is mixed: meteoric waters from the uplands of the Koryaksky volcano and water with a magmatic component are observed. The system of identified productive faults and the magmatic fracking system of the volcano are geometrically related.

Keywords: Geothermal, Fracking, Magma, Reservoirs, Volcanoes

Термогидродинамическое моделирование условий формирования ГТС в ЮЗЗ секторе Корякского вулкана

П.О. Воронин, А.В. Кирюхин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Выполнено моделирование условий формирования Кеткинской гидротермальной системы с учётом возможной Корякско-Кеткинской магма-гидротермальной взаимосвязи. По результатам моделирования установлено, что источником теплового питания могут быть инъекции магмы в виде силлов и даек в диапазоне глубин от –6 до –3 км абс. в юго-западном секторе вулкана Корякский и конвективный тепловой поток из вмещающих пород, при этом водное питание судя по изотопному составу воды смешанное: наблюдаются метеорные воды с возвышенностей Корякского вулкана и воды с магматической составляющей. Система выявленных продуктивных разломов и система магматического фразинга вулкана геометрически связаны.

Ключевые слова: геотермальный, фразинг, магма, резервуары, вулканы

Введение

Авачинско-Корякский – вулканогенный бассейн площадью 2530 км² 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 °С/км. Фундамент бассейна сложен верхнемеловыми отложениями, K₂, которые представлены метаморфическими породами с низкой пористостью и проницаемостью в целом, однако присутствуют локальные зоны трещиноватости (Позднеев 2003, Кирюхин и др. 2010).

По составу газа флюиды вулканического фундамента (за исключением северного склона Корякского вулкана) характеризуются повсеместным распределением метана (около 70 об.%), обнаруженного в скважинах Кеткинского геотермального месторождения, вдоль юго-восточной периферии Пиначевского экструзионного массива (скв. ГК1, Пиначевские источники), к юго-западу от вулкана Корякский (скв. Е-1) и скважины в районе Радыгинской площади (скв. R3).

Известны естественные разгрузки подземных вод с повышенной соленостью в районе Кеткинского геотермального поля – Зеленовские озера юго-западнее Корякского вулкана (Мальцева и др. 2011). Проведенные геоэлектрические исследования (Нурмухамедов 1984) выявили одну из изолированных высокопроводящих геофизических аномалий с высокой

проводимостью от 13 до 20 Ом в районе Зеленовских озерков с помощью бурения в 1986 году. Скважина 23 глубиной 341 м. вывела термальные воды на поверхность (расход самоизлива 9,3 л/с, температура воды на устье 57 °С, избыточное давление 0,73 атм.

Условия водного питания Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна изучены с использованием данных по изотопному составу воды (δD , $\delta^{18}O$) и углерода в свободном газе $\delta^{13}C$. По изотопному составу углерода $\delta^{13}C$ в CH_4 в пробах свободного газа метановые скважины Кеткинского геотермального месторождения (К1, $\delta^{13}C = -34$ ‰) и Радыгинской площади (Р3, $\delta^{13}C = -61$ ‰) – значительно отличаются. Газ из скважины К1 формируется в более высокотемпературных условиях, чем газ из скважины Р3, 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 $-36,9 \div -38$ ‰, Кшукское $-43,1$ ‰).

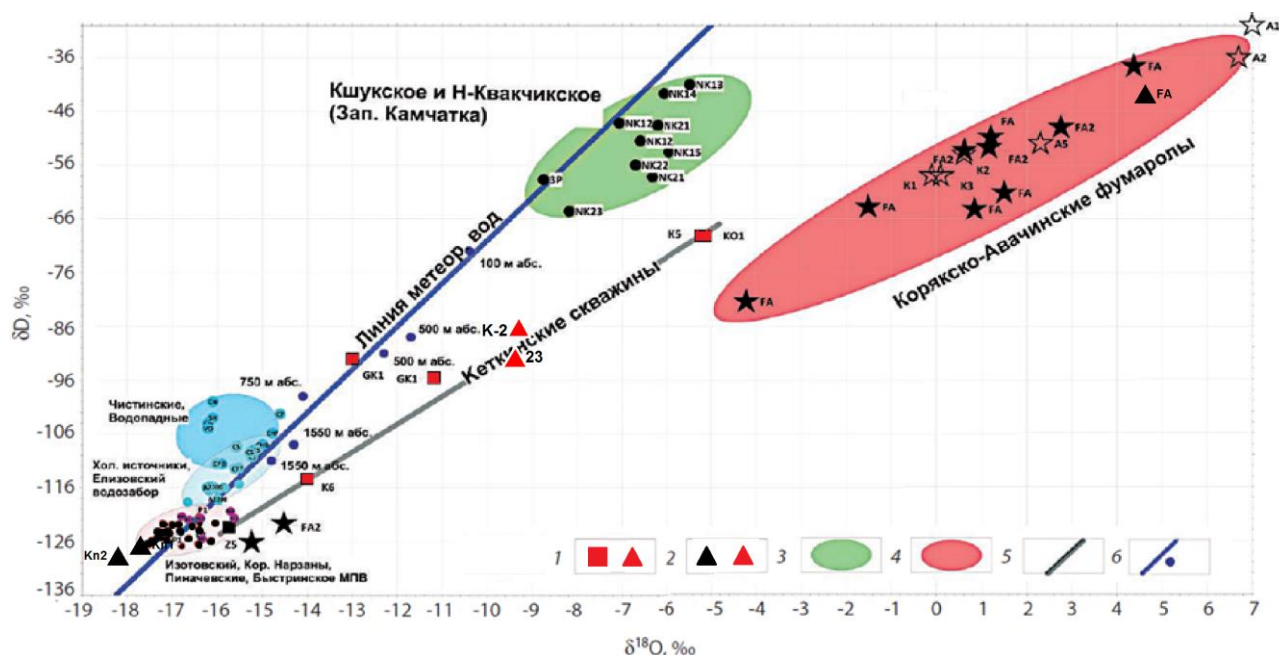


Рисунок 1 – Результаты измерений изотопного состава вод Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна: 1 – пробы из скважин Кеткинского геотермального месторождения; 2 – наиболее свежие пробы, отобранные в 2020 году; 3 – водная фаза с Западно-Камчатских газоконденсатных месторождений; 4 – конденсат воды из Авачинских и Корякских фумарол; 5 – линия Кеткинских геотермальных скважин; 6 – репрезентативные источники метеорной воды на Камчатке и линия метеорных вод Крейга

По данным опробования Авачинских фумарол и Кеткинского геотермального месторождения 2014–2020 гг. (Рис. 1), вода характеризуется диапазоном изотопного состава, отражающим смесь воды магматического и метеорного происхождения, высокая концентрация метана указывает приток из водно-метановых бассейнов.

Возможно, что обогащение вулканогенного бассейна метаном происходит в результате термического и геомеханического воздействия в зонах внедрения магмы, питающей Корякский и Авачинский вулканы на вмещающие вулканогенно-осадочные породы, содержащие органическое вещество разнообразного происхождения. Тем не менее, низкие значения $\delta^{13}C$ (CO_2) ($-49,7 \div -16,8$ ‰) в метановых скважинах показывают, что значительная доля CO_2 здесь немагматического происхождения, и парагенетически связана с метаном.

Системы магматического фраксинга в ЮЗ секторе Корякского вулкана

Основная часть инъекции магмы под Корякский вулкан произошла на глубинах $-3,0 \div -5,5$ км абс у его юго-западного подножия на расстоянии менее 1,5–4,0 км от вершины (июль 2008 г. – январь 2009 г.). Дополнительный Frac-Digger анализ данных MEQ (данные КБГС РАН) с 01.2000 по 10.2019 с параметрами поиска ($\delta t \leq 30$ сут., $\delta R \leq 6$ км, $\delta Z \leq 0,2$ км, $N \geq 6$) выявил инъекции магмы. Этот комплекс включает одиннадцать даек/силов с углами

падения менее 26 градусов на глубинах от –6,0 до –3,2 км абс. (время этих событий август 2008 г. – август 2009 г.). Видимая длина в вертикальном разрезе до 4 км (силл № 49). Азимут падения некоторых из этих силлов (#49 и #76) ориентированы в северо-восточном направлении, что означает, что на их продолжении в сторону Кеткинского продуктивного геотермального резервуара могут формироваться проницаемые термовыводящие разломы, при условии, что магматическая деятельность Корякского вулкана осуществляется в течение длительного геологического времени (от сотен до тысяч лет) в аналогичном геомеханическом режиме.

Система продуктивных разломов Кеткинского резервуара

Для выявления продуктивных разломов была использована программа Frac-Digger2 (Кириухин 2016, Кириухин 2017), позволяющая выявлять плоско-ориентированные кластеры продуктивных зон в скважинах. Для выборки элементов плоско-ориентированных кластеров используются следующие критерии: 1) Близость в горизонтальной плоскости δR ; 2) Ориентация близости к плоскости δZ (расстояние между элементом образца и плоскостью); и 3) Минимальное количество элементов в плоско-ориентированном кластере N . В программе FRAC-Digger2 выборка из набора точек в трехмерной пространственно-временной области выполняется случайным образом (с использованием метода Монте-Карло). Это позволяет избежать зависимости решения от упорядоченности исходного набора точек по времени, что чрезвычайно важно для трехмерного анализа распределения продуктивных зон и выявления продуктивных разломов. При поиске K элементов из списка, состоящего из N элементов, максимальное количество уникальных генераций ограничено временем итерации, поэтому выполняется несколько запусков программы для подтверждения достоверности выявленных продуктивных разломов.

При расчетах продуктивных зон Кеткинского геотермального месторождения приняты следующие расчетные параметры: $\delta R = 4$ км, $\delta Z = 100$ м (50 м), $N = 6$. В качестве исходных данных использованы глубины вскрытий кровли продуктивных зон (по каталогу скважин Кеткинского геотермального поля с учетом отклонения скважин 4А и 8), всего 87 зон. В результате были выявлены три продуктивных разлома: угол их падения составил 76° , 77° и 24° , азимут падения 38.1° , 109.8° и 139.1° , абсолютная отметка –641 м, –553 м и –680 м, площадь $1,76 \text{ км}^2$, $0,49 \text{ км}^2$ и $3,95 \text{ км}^2$, суммарная продуктивность 60,5 кг/с, 43,3 кг/с и 17,9 кг/с.

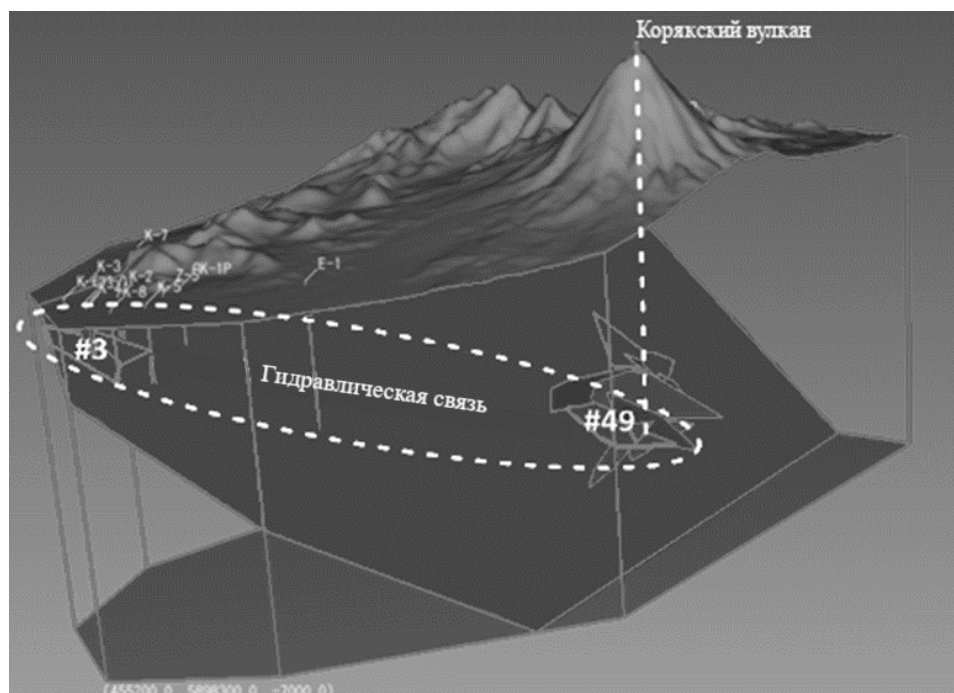


Рисунок 2 – Трехмерное изображение системы магматического фразинга (показаны только пологие силлы / дайки) под Корякским вулканом (таблица) и продуктивные разломы в Кеткинском геотермальном резервуаре

Гидравлическая связь: Кеткинский геотермальный резервуар – система магматического фракинга Корякского вулкана

Теперь мы можем объединить информацию о системе фракинга магмы под Корякским вулканом с системой продуктивных разломов Кеткинского геотермального резервуара в единый трехмерный вид, где мы можем увидеть плоскость контакта между магматической и гидротермальной системами, если плоскость продуктивного разлома № 3 будет продолжена на СВВ, то она пересечет плоскость пологого силла № 49 (Рис. 2), несмотря на то, что они находятся на расстоянии от 20 до 25 км друг от друга. Таким образом, возможна гидравлическая связь между продуктивными резервуарами Кеткинского геотермального месторождения и системой магматического фракинга Корякского вулкана. Выполненное TOUGH2 EWASG моделирование также подтверждает возможность этой связи.

TOUGH2 EWASG моделирование гидравлической связи между Корякским вулканом и кеткинским геотермальным резервуаром

Для сборки модели возможной Корякско-Кеткинской магма-гидротермальной взаимосвязи и моделирования использованы PetraSim v. 5.2 и iTOUGH2-EOS14 (EWASG).

Геометрия профильной 2D-модели (Рис. 3) включает верхнюю часть объема, характеризующуюся интенсивным внедрением даек под Корякским вулканом и Кеткинскую геотермальную систему в его ЮЗЗ секторе. Кровля модели определена согласно топографической поверхности Корякского вулкана, подошва модели задана на абс. отм. –5 км. При создании модели использована прямоугольная 2D – вычислительная сетка со следующими параметрами разбиения: $\Delta X = 300$ м ($NX = 93$) и $\Delta Z = 150$ м ($NZ = 53$), соответственно. Также была задана ширина модели $\Delta Y = 1$ км ($NY = 1$).

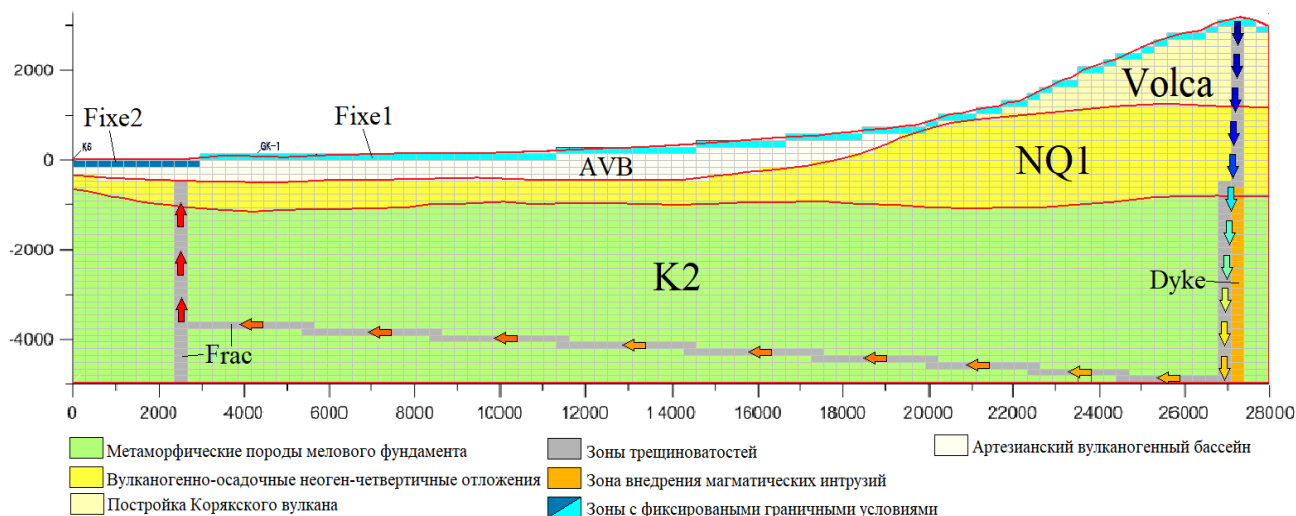


Рисунок 3 – геометрия TOUGH2 EWASG модели гидравлической связи между Корякским вулканом и Кеткинским геотермальным резервуаром

В модели представлены следующие геологические подразделения, которые определены в виде доменов с индивидуальными материальными (фильтрационно-ёмкостными и теплофизическими) свойствами: 1) метаморфические породы мелового фундамента (домен «K2»); 2) вулканогенно-осадочные неоген-четвертичные отложения (домен «NQ1»); 3) артезианский вулканогенный бассейн (домен «AVB»); 4) вулканические породы Корякского вулкана (домен «Volca»); 5) зона внедрения магматических интрузий (домен «Dyke»). 6) система продуктивных разломов (домен «Frac»). В модели также определены различные виды граничных условий: 1) с фиксированным двухфазным состоянием основных переменных на поверхности Корякского вулкана выше абс. отм. +300 м (домен «Fixe1»); 2) с фиксированным однофазным состоянием основных переменных на поверхности Корякского вулкана ниже абс. отм. +300 м (домен «Fixe2»). Значения заданных параметров доменов, указанных выше, и начальные условия приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Материальные свойства, заданные на модели

Параметры домена	Домены модели					
	K2	NQ1	AVB	Volca	Duke	Frac
Проницаемость, 10^{-15} , м ²	1	100.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
Пористость	0.02	0.2	0.2	0.2	0.02	0.02
Плотность (минералогическая), кг/м ³	2700	2200	2600	2600	2700	2700
Теплопроводность, Вт/(м °С)	2.0	1.4	1.4	1.4	2.0	2.0

Таблица 2. Начальные и граничные условия, заданные на модели

Основные переменные	Домены модели						
	K2	NQ1	AVB	Volca	Duke	Fixe1	Fixe2
Давление	Гидростатическое $\Delta P/\Delta Z=10$ Мпа/км						1 бар
Температура	$\Delta T/\Delta Z=24$ °С/км					10 °С	
S_g	-						0.9

На границе модели в районе Кеткинского геотермального месторождения заданы условия разгрузки подземных вод – постоянное давление (граничное условие Дирихле 1-го рода, давление 1 бар). На поверхности слоя вулканов задано условие постоянного насыщения воздушной фазы (0,8). Инфильтрационное питание задаётся во внутренних элементах постройки вулкана выше 2000 м абс.

Тепловой поток по подошве модели задан как 0,05 Вт/м², для зоны внедрения даек как 2,5 Мвт. Массовый расход метана в зоне внедрения даек был задан 1e-3 кг/с. Скважины ГК-1 и К6 были заданы в режиме самоизлива.

Время моделирования заданно 7000 лет. Предполагается, что за указанное время морфология Корякского вулкана, условия инъекции магмы в его постройку и водное питание существенно не менялись.

По результатам моделирования установлено, что источником теплового питания Кеткинского геотермального месторождения могут быть инъекции магмы в виде силлов и даек в диапазоне глубин от –6 до –3 км абс. в юго-западном секторе вулкана Корякский и конвективный тепловой поток из вмещающих пород. В полученной модели происходит инфильтрация вод ледника Корякского вулкана по проницаемым зонам под постройку вулкана в зону внедрения даек, где смешивается с водами мелового фундамента и нагревается, после чего по проницаемым разломам уходит в сторону Кеткинского месторождения.

Выводы

1. В диапазоне бурения скважинами на глубину 2,4 км ось термоаномалии опускается в направлении ЮВВ, при этом градиенты давления флюида и газосодержания CH₄ (термогенного происхождения) направлены в СВВ. Таким образом, Кеткинское геотермальное месторождение является продуктом закачки магмы и воды из Корякского вулкана.

2. Источником теплового питания могут быть инъекции магмы в виде силлов и даек в диапазоне глубин от –6 до –3 км абс. в юго-западном секторе вулкана Корякский и конвективный тепловой поток из вмещающих пород. Водное питание судя по изотопному составу воды смешанное: наблюдаются метеорные воды с возвышенностей Корякского вулкана и воды с магматической составляющей.

3. Корякско-Кеткинская магма-гидротермальная взаимосвязь также подтверждается системой выявленных продуктивных разломов геометрически сопряжена с некоторыми формами магматического гидроразрыва.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ_а «Магматический фракинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА–А20–120121090010–7.

Использованные в работе сейсмические данные получены на крупномасштабной научно-исследовательской установке «Сейсмический инфразвуковой массив для мониторинга криолитозоны Арктики и непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Измерения содержания дейтерия и кислорода-18 выполнены в РЦ РДМИ Научного парка СПбГУ, производились на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L2120-i в режиме высокой производительности. В качестве стандартов использовались V-SMOW2, GISP, SLAP, USGS-45 USGS-46. Ошибка измерений составляла $\pm 0,1$ ‰ по $\delta^{18}O$ и ± 1 ‰ по δ^2H . Результаты измерений приведены относительно SMOW.

Список литературы

1. Поздеев А. И. Углеводородная газогенерация Авачинской депрессии, ее перспективы и связь с сейсмичностью / А.И. Поздеев // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 44–54.
2. Кирюхин А. В., Кирюхин В. А., Манухин Ю.Ф. Гидрогеология вулканогенов. / А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин СПб.: Наука, 2010. 395 с.
3. Мальцева К.И. Отчет «Подсчет запасов теплоэнергетических вод Кеткинского месторождения (по состоянию на 31 декабря 2010 г.)» по Контракту № 29 / 10 от 20.09.2010. (в 2 кн.) / К.И. Мальцева, Т.К. Котельникова, И.Н. Нажалова. Елизово, 2011. 262 с.
4. Нурмухамедов А.Г., Нетесов Ю.А. Отчет о геофизических работах, выполненных 2-й Кеткинской партией в 1982–1984 гг. Пиначевская площадь. 1984 г.
5. Кирюхин П.А., Кирюхин А.В. Frac-Digger. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ № 2016612168 of 21.06.2016.
6. Кирюхин П.А., Кирюхин А.В. Frac-Digger2. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ № 2017618050 of 21.09.2017.
7. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

Some Methodological Aspects of Increasing the Resource Potential of Hydrocarbons in Kamchatka

Ivan Delemen

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

Some methodological aspects of increasing the resource potential of hydrocarbons in Kamchatka are considered. The conclusion is made about the multi-levels vertical placement of potential hydrocarbon deposits. In addition to plicative structures and disjunctives, thrust and stamp tectonics, as well as rift-like structures, play a leading role in the structural control of the migration and accumulation of hydrocarbon fluids.

Keywords: faults, forecast, hydrocarbons, Kamchatka, methodology, thrusts

Некоторые методологические аспекты наращивания ресурсного потенциала углеводородов на Камчатке

И.Ф. Делемень

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Рассмотрены некоторые методологические аспекты наращивания ресурсного потенциала углеводородов на Камчатке. Сделан вывод о многоэтажности вертикального размещения потенциальных залежей углеводородов. Помимо пликативных структур и дизъюнктивов, ведущую роль в структурном контроле миграции и накопления углеводородных флюидов играют надвиговая и штамповая тектоника, а также рифтоподобные структуры.

Ключевые слова: Камчатка, методология, надвиги, прогноз, углеводороды, разломы, флюиды

Введение

Высокий риск преждевременного истощения запасов эксплуатируемых месторождений газоконденсата на Камчатке потребовал поиска новых ресурсов углеводородов (Ившина и др., 2010, Кирюхин, 2020). Изучение нефтегазоносности региона имеет также высокую теоретическую актуальность, так как здесь разгрузка углеводородных флюидов на земную поверхность пространственно сопряжена с зонами активного вулканизма, интенсивной сейсмичности и циркуляции термальных вод, что позволяет лучше понять условия образования, миграции и накопления углеводородов (УГВ).

Традиционная методология наращивания ресурсов УГВ и ее результаты

Использование традиционных методов прогноза и поисков нефти и газа привело к выявлению нескольких потенциально нефтегазоносных осадочных бассейнов, в пределах которых за несколько десятилетий геолого-геофизических исследований, были обнаружены сотни благоприятных для аккумуляции углеводородов геологических структур (антиклиналей, куполов и т.д.), а также многочисленные прямые и косвенные признаки разгрузки нефти и газа на поверхность суши и на дно шельфа.

Бассейновый анализ (БА) – основной метод таких исследований. Изучение условий формирования, миграции и аккумуляции нефти и газа в осадочных бассейнах позволяет оценивать в них масштабы запасов нефти и газа. Перспективы нахождения ресурсов нефти и газа были оценены с учетом того, что территория Камчатского края расположена на сочленении трех крупнейших нефтегазоносных провинций (НГП) Дальнего Востока России – Охотоморской Берингоморской и Притихоокеанской. В их пределах на территории края установлены 5 нефтегазоносных областей (НГСП), а в них выделяются более мелкие осадочные районы – нефтегазоносные бассейны (НГБ).

Запасы УГВ определяются мощностью осадочных толщ, выполняющих НГБ, мощность которых в наиболее глубоких из них (Колпаковский и Ичинский прогибы) превышает 5–7 км. В других прогибах мощность осадков меньше, от 5,5 до 6,0 км (Восточно-Камчатский, Воямпольский, Голыгинский, Козыревский), 4,5–5,5 (Пенжинский), до 4,5 (Кинкильский) и до 3,5 км (Вывенский). Предстоит еще изучить нефтегазоносность Камчатско-Притихоокеанской НГСП, а также Ильпинско-Карагинского, Кольского, Хайрюзовского и Центрально-Камчатского прогибов, а также газоносность Паужетско-Кошелевского геотермального района.

Метод аналогии основанный на учете сходства в формировании основных нефтегазогенерирующих комплексов различных регионов, широко используется в бассейновом анализе. Так, в Сахалинском секторе Охотоморской НГП перспективы расширения ресурсной базы УГВ связывают с возможностью нахождения новых залежей в отложениях палеогена и возможно, верхнего мела (Хисамутдинова, 2016). В принципе, методы БА предусматривают учет не только таких факторов нефтегазообразования, миграции и накопления УГВ, как развитие трансгрессивно-регрессивных циклов или формирование антиклинальных структур, но и надвигов, а также подъем флюидов в осадочные толщи нефтегазоносных бассейнов из более глубоких горизонтов недр планеты.

Концепция многоэтажности нефтегазовых коллекторов может быть использована для поиска новых залежей как на обоих эксплуатируемых (Кшукское и Нижне-Квакчикское), так и двух разведываемых (Северо-Колпаковское и Средне-Кунжинское) газоконденсатных месторождениях Колпаковского прогибов. Так, по аналогии с Сахалинским сектором Охотоморской НГП, в разрезе верхнего (кайнозойского) яруса осадочных отложений Колпаковского прогиба, коллекторы порового и трещинно-порового типа могут быть встречены в песчаниках, аргиллитах и алевролитах палеогена (напанская и снатольская свиты, средний эоцен). В отложениях менее пористых сланцев и глинистых песчаников ковачинской свиты (поздний эоцен – ранний олигоцен), а также в несортированных конгломератах и конгломератобрекчиях хулгунской свиты (верхний палеоцен), не исключено обнаружение коллекторов с трещинным типом проницаемости.

Синтез методологических подходов к прогнозу и поиску УГВ

Одной из важнейших парадигм БА является предположение о прямой связи между масштабами нефтегазогенерации в осадочных толщах и количеством аккумулированных в них объемов нефти и газа. Считается, что пространственная разобщенность нефтегазоматеринских толщ и залежей УГВ относительно невелика. Размеры продуктивных залежей газоконденсатных месторождений в Колпаковском прогибе (в пределах кайнозойской части разреза) не превышают размеров, типичных для мелких месторождений, хотя бассейновый анализ не исключает возможности нахождения в нем крупных и даже гигантских залежей. В осадочных бассейнах полуострова выявлено более сотни положительных тектонических структур – антиклиналей и брахискладок. Однако всё более актуальной становится проблема выявления критериев прогноза коллекторов иных типов. Дальнейшие перспективы расширения ресурсной базы УГВ определяются синтезом методологических подходов БА с концепцией глубинной нефти и газа.

Концепция глубинной нефти и газа изначально разрабатывалась на основе гипотез абиогенного происхождения нефти, молекулярного водорода и УГВ газов (Сейфуль-Мулюков, 2013). Сторонники каждой из концепций приводили многочисленные данные, противоречащие, на их взгляд, альтернативным точкам зрения. Так, одним из доказательств истинности органического происхождения нефти, считалось отсутствие значимой естественной разгрузки потоков молекулярного водорода из недр планеты в атмосферу, за исключением областей современной вулканической деятельности. Однако наши исследования позволили установить, что и на Камчатке водород поступает в атмосферу не только в зонах современного базальтового вулканизма, но и в невулканических районах – на участках новейшего рифтогенного растяжения земной коры и вскрытия глубокими скважинами (2–2,5 км и более) ультрабазитовых тел и остывающих магматических очагов. Выяснилось, так же, что из-за полигенности источников H_2

в недрах, наличие или отсутствие потоков этого газа на поверхности планеты не может служить ни доказательством, ни опровержением той или иной гипотезы. То же можно сказать и об известном в органической геохимии парадоксе несоответствия предельных содержаний водорода в первичном органическом веществе и в сырой нефти, который может быть объясним и в рамках биогенных моделей, без привлечения реакций, рассматриваемых в неорганической химии. Полемика вокруг возможности abiогенного происхождения УГВ, позволила развить существующие методы БА. Сейчас под глубинной нефтью и газом обычно понимают не abiогенные УГВ, а потоки нефти и газа, поступившие в осадочный бассейн из недр, более глубоких, чем его подошва.

Рифтинг и другие типы деформации плит, наряду с условиями осадконакопления, фациально-формационными особенностями и палеобатиметрией осадочных бассейнов, в нефтегазовой геологии хорошо изучены. Он обеспечивает формирование субвертикальных зон высокой проницаемости в ОБ, причем образование рифтов предшествует заложению осадочных бассейнов. Так, по мнению ряда исследователей, образованию Центрально-Камчатской депрессии в маастрихт-палеоценовое время предшествовал раскол дна морского бассейна с образованием рифта. В дальнейшем, с эоцена и до настоящего времени происходило заполнение образовавшегося прогиба полигенными осадочными отложениями. В наиболее погруженных частях рифтов сформировались депоцентры – участки прогибов, в которых мощность осадков достигает наибольших значений. Однако для прогностических целей важно то, что процессы растяжения литосферы и земной коры Камчатского региона, продолжаются и в настоящее время, в условиях преобладания регионального сжатия в обстановке тектонической коллизии плит (Константиновская, 2003). Образующиеся небольшие рифты, рифтоподобные структуры и грабены, а также сбросы и другие дизъюнктивы растяжения, способствуют подъему глубинных УГВ флюидов в верхние части земной коры. Не случайно, известные на суше и шельфе многочисленные места естественной разгрузки нефти и газа, пространственно совпадают с зонами таких тектонических нарушений (Шакиров и др., 2016) и вулканоструктур (Поздеев и др., 2012).

Надвиги и их роль в экранировании ловушек нефти и газа хорошо изучены в нефтяной геологии. Однако трансфер таких знаний в применении БА к прогнозу ресурсов нефти и газа в рассматриваемом регионе еще не произошел. Примером может служить тот же Колпаковский прогиб, где небольшим эксплуатируемым газоконденсатным месторождениям грозит исчерпание ресурсов, а планы пополнения запасов по прежнему формируют в рамках установившихся представлений и концепций. Между тем, сместители надвигов в процессах миграции и аккумуляции УВ играют роль экранов, на которых формируются коллекторы нефти и газа. Чешуи надвигов имеют региональное распространение, и в восточной (Тихонов, 1968), и в западной частях полуострова (Соловьев, 2005), что является одним из необходимых условий для формирования крупных залежей УГВ. Так, в пределах Западной Камчатки и прикамчатского шельфа Охотского моря, особое внимание следует обращать на надвинутые на кайнозойские и более древние отложения прогибов аллохтонные чешуи надвигов с разгрузкой нефти и газа вдоль зон растяжения.

По данным сейсморазведочных и тектонических исследований, установлено, что в восточном обрамлении Западно-Камчатского прогиба на отложения этого осадочного бассейна надвинуты толщи пород, слагающих горные сооружения Срединного хребта. Известно также, что аллохтонные пластины рассматриваемого надвига налегают на аллохтонные толщи верхнего (кайнозойского) нефтегазоносного яруса Колпаковского и (предположительно) смежных с ним Кольского и Ичинского прогибов.

Обсуждение результатов

Проводившаяся длительное время разведка нефти на потенциально нефтегазоносной Богачевской площади (Восточная Камчатка) и на других потенциально нефтегазоперспективных площадях Камчатки (Белова и др., 1961), вплоть до 60-х годов прошлого века, проводилась скважинами глубиной от первых сотен метров до 2,5 км, которые так и не достигли кровли возможного крупного тектонического коллектора,

приуроченного к подошве одного из аллохтонных покровов и входящего в систему регионального надвига Восточной Камчатки. Учитывая вышесказанное, основанные на БА оценки высокой перспективности нахождения новых залежей нефти и газа могут быть подтверждены нахождением новых месторождений УГВ, в том числе крупных. Для этого необходимо развить методы БА с привлечением трансфера смежных с геологией нефти и газа дисциплин – тектодинамики, теории надвигов и концепции глубинных УГВ. До сих пор вызывает большой интерес у специалистов результаты разведки Богачевской, Воямпольской и других длительно разведываемых в середине прошлого века нефтегазоносных площадей Камчатки. Так, нет ясности в том, произошло ли естественное истощение запасов УГВ на Богачевском нефтегазопроявлении, или же скважины не достигли центральной части нефтяного резервуара. Разведочные и поисковые работы на нефть на Камчатке были надолго прекращены после аварии, случившейся при достижении самой глубокой там скважиной (№ Р-6) кровли продуктивной зоны (глубина 2501 м). При аварии было собрано более 300 литров чистой легкой нефти. Интенсивные нефтегазопроявления, продолжавшиеся вплоть до прекращения бурения скважины, были отмечены еще выше (на глубине 2367,8 м), при вскрытии кровли крупнопористых эффузивных пород (Горбач и др., 2017).

Ресурсы УГВ в Камчатском крае могут быть расширены также за счет поиска залежей сланцевой нефти и газа, для обнаружения которых известны все необходимые предпосылки. Представляют интерес и ресурсы метана угольных месторождений, а также артезианские воды глубокого заложения с растворенным в них метаном.

Любопытно, что резервуары таких метаноносных вод нередко сложены нижнемеловыми черносланцевыми толщами. Примером может служить Авачинско-Корякская вулcano-тектоническая депрессия, обрамляющая постройки действующих Авачинского и Корякского вулканов. Десятки лет были известны высокие содержания растворенного метана в подземных водах этой депрессии, что объяснялось с позиций традиционной концепции газонасыщенности вод глубокого заложения. В начале нового столетия А.И. Байков предложил рассматривать депрессию как метаноносный бассейн с промышленно значимыми ресурсами CH_4 (Байков и др., 2008). Хотя и не исключаются традиционные механизмы формирования таких бассейнов на Камчатке (Аносов и др., 2002), однако поступление метана в водоносные горизонты обеспечивается, вероятно, за счет высвобождения метана из пор и матрикса насыщенных органикой сланцев под воздействием сейсмических колебаний различной амплитуды, а также теплового воздействия при поступлении в резервуар термальных вод, нагретых газов и магматического материала от смежной с ним магматической питающей системы обеих вулканов. Высвобождающийся газ растворяется в подземных водах над бассейном сланцевого газа.

Не исключено, что события Халактырского феномена 2020 года, были следствием спонтанного выброса в морские воды и атмосферу значительных количеств метана при термическом разрушении газогидратов в осадочной толще прибрежной части дна Авачинского залива (Делемень, 2021). Опасностью таких процессов также нельзя пренебрегать.

Выводы

– Успех дальнейших исследований в нефтегазовой геологии суши и шельфа Камчатского края, определится синтезом основанных на бассейновом анализе традиционных походов, с изучением рифтинга, штамповой тектоники и особенно экранирующей роли надвигов и шарьяжей, с привлечением новых подходов концепции глубинной нефти и газа.

– Нарращивание запасов месторождений газоконденсата Соболевской группы месторождений может быть выполнено путем поиска коллекторов газа на более глубоких уровнях домиоценовых отложений Колпаковского прогиба, а также в подошве аллохтонных чешуй надвигов, надвинутых на осадочные бассейны Западно-Камчатского прогиба.

– Необходимо комплексное изучение Богачевской нефтегазоносной площади с постановкой глубокого научного бурения (с выполнением всех требований экологической безопасности на территориях ООПТ на уровне мировых стандартов).

Список литературы

1. *Аносов Г. И.* Камчатская нефтегазовая перспективная провинция / *Г.И. Аносов, А.И. Байков, И.Ф. Делемень и др.* // Вулканизм и связанные с ним процессы. Строение, геодинамика и металлогения Охотского района и прилегающих частей Северо-Западной Тихоокеанской плиты: материалы Международного симпозиума, Южно-Сахалинск, 24–28 сентября 2002. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. С. 6–9.
2. *Байков А. И.* Вулканизм и Авачинский перспективно нефтегазоносный район / *А.И. Байков, Г.Ф. Васильев, Р.Л. Дунин-Барковский и др.* // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2008. г. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 23–27.
3. Белова М.Б. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Камчатки / *М.Б. Белова, В.Г. Васильев, Г.М. Власов; ред. В.Г. Васильев.* М.: ГНТИ и НиГТЛ, 1961. 344 с.
4. *Горбач А.А.* К вопросу о нефти в Кроноцком заповеднике / *А.А. Горбач, В.А. Горбач* // Вестник ДВО РАН. 2017. № 4. С. 16–28.
5. *Делемень И.Ф.* О природе Халактырского экологического феномена (Камчатка) в связи с оценкой роли газового фактора в экологии человека / *И.Ф. Делемень* // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2021 г. Петропавловск-Камчатский, 2021. С. 156–159.
6. *Ившина Е.В.* Перспективы нефтегазоносности Камчатского края и прилегающего шельфа / *Е.В. Ившина, Ю.Б. Силантьев, Т.О. Халошина* // Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 года. М.: ОАО «Газпром», ООО «ГазпромВНИИГАЗ». 2010. С. 102–108.
7. *Константиновская Е. А.* Тектоника восточных окраин Азии: структурное развитие и геодинамическое моделирование / *Е.А. Константиновская* М.: Научный Мир, 2003. 224 с.
8. *Поздеев А.И.* Углеводородная газогенерация недр Камчатки, проблемы связи ее с вулканизмом и гидротермальной деятельностью / *А.И. Поздеев, А.Г. Николаева* // Вулканология и сейсмология. 2012. № 1. С. 37–55.
9. *Сейфуль-Мулюков Р.Б.* Геологическое и геохимическое обоснование глубинного генезиса нефти / *Р.Б. Сейфуль-Мулюков* // Глубинная нефть. 2013. Т. 1, № 12. С. 1961–1979.
10. *Соловьев А. В.* Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит методами трекового датирования и структурного анализа: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / *А.В. Соловьев*; ГИН РАН. М.: ГИН РАН, 2018. 49 с.
11. *Тихонов В. И.* Надвиги на Восточной Камчатке / *В.И. Тихонов* // Геотектоника. 1968. № 3. С. 88–101.
12. *Хисамутдинова А.И.* Палеогеновый этап развития Западно-Камчатского осадочного бассейна (Тигильский район): литология, геохронология, палеогеография : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / *А.И. Хисамутдинова*; рук.работы *А. В. Соловьев*; ГИН РАН. М.: ГИН РАН, 2016. 27 с.
13. *Шакиров Р.Б.* К дискуссии об особенностях распределения и перспективах исследования газогеохимических полей западной части п-ва Камчатка и прилегающего шельфа / *Р.Б. Шакиров, А.И. Обжиров, И.Ф. Делемень и др.* // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XIX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2016 г. Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 467–473.
14. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

CHAPTER VII. THE MECHANISM OF FUNCTIONING OF GEYSERS AND CATASTROPHIC PROCESSES IN HYDROTHERMAL SYSTEMS

РАЗДЕЛ VII. МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ И КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 551.21 : 551.233

Geysers of the Akademia nauk caldera (Kamchatka): location, morphology, dynamics of eruptions, evolution of water composition

Gennadiy Karpov

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

The material of studies of geysers in the caldera of the Academy of Sciences (Kamchatka, Russia) is considered, and it is concluded that their occurrence and activity is controlled by the activity of the submeridional strike fault zone and depends on the impulse inflow of high-enthalpy CO₂ into a shallow chamber in the geyser channel.

Keywords: geyser, caldera, eruption regime, hydrothermal chemistry, gases

Гейзеры кальдеры Академии Наук (Камчатка): местоположение, морфология выходов, механизм и динамика извержений, эволюция состава терм

Г.А. Карпов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Рассматривается материал исследований гейзеров в кальдере Академии Наук (Камчатка). Сделан вывод о том, что их возникновение и деятельность контролируется активностью разломной зоны субмеридианального простирания и зависит от импульсного притока высокоэнтальпийного CO₂ в расположенную неглубоко камеру в канале гейзера.

Ключевые слова: гейзер, кальдера, режим извержений, химизм гидротерм, газы

Кальдера вулкана Академии Наук находится в южном секторе долгоживущего Карымского вулканического центра. Она образовалась порядка 28-48 тыс. лет назад (Базанова, 1980) и в настоящее время заполнена пресноводным Карымским озером. Гейзеры в кальдере были открыты в 1938 г (Троицкий, 1947), многократно посещались и коротко описывались вулканологами (Иванов, 1974; Вакин, Пилипенко, 1998). Морфологически выделяются две группы гейзерного режима истечения гидротерм: Восточная и Западная. Обе они приурочены к южному берегу Карымского озера (рис 1, Рис. 2, слева). В Восточной группе сформировались две крупные ванны, заполненные горячей водой, сливающейся в них от многочисленных мелких пульсирующих источников.

По сохранившимся фрагментам отложений гейзерита видно, что ранее здесь было несколько выходов гейзеров. В настоящее время в районе ванны действуют пульсирующие источники, химизм вод которых близок к гейзерным термам этой структуры. Западнее этой ванны, под крутым бортом, располагается крупный грифон гейзера «Старого» (Рис. 2, справа).

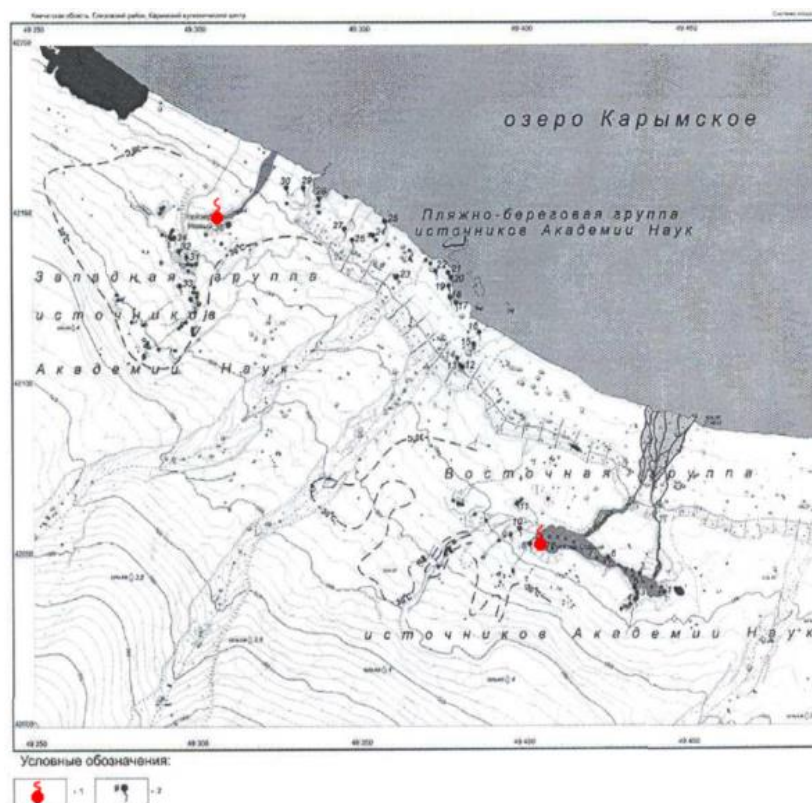


Рисунок 1 – Карта южного берега оз. Карымского с двумя группами гидротерм и двумя гейзерами. Условными значками показаны гейзеры (красные точки) и термальные источники (черные точки)



Рисунок 2 – Две группы гидротерм Академии Наук (слева) и извержение гейзера Старый (справа)

Механизм и динамика извержений гейзеров кальдеры

В результате фреато-магматического извержения в озере в 1996 г в Ю-3 секторе борта кальдеры возник гейзер, получивший название «Новый». Мы наблюдали одновременное извержение вулкана Карымский и этого гейзера (Рис. 3, слева). Он расположен в котловине диаметром 2,5 м (Рис. 3, справа).

Характерно, что после фреато-магматического извержения в озере общая минерализация и доля Cl-Na компоненты в термах гейзера «Старого» существенно возросла, но уже через 6 лет стала снижаться. Содержание хлоридно-натриевой компоненты гейзера «Нового» до 2015 года оставалось более-менее стабильным. В воде этого гейзера наблюдается повышенное содержание В, V, Mo, Zn, Cu, As, Li, Ba.



Рисунок 3 – Одновременное извержение вулкана Карымский и гейзера «Новый» (слева).
Справа – извержение гейзера «Нового»

Режим работы подводного гейзера «Старый» неустойчивый и зависит как от объёма поверхностной воды, остающейся в грифоне после извержения, так и от температуры воздуха, влияющей на скорость охлаждения выброшенной воды в грифоне.

По данным измерений времени работы гейзера «Новый» (Рис. 4) видно, что его режим был довольно-таки стабилен, хотя стадия покоя, иногда колебалась в пределах 13 минут.

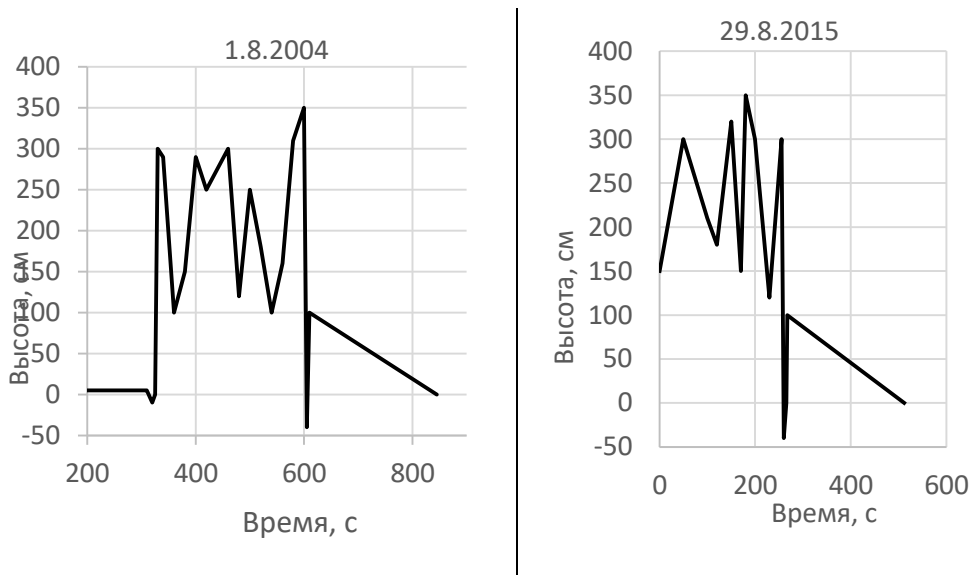


Рисунок 4 – Графики режима работы гейзера «Новый»

После окончания фонтанирования и слива в озеро выброшенной воды, канал опустошается до глубины 35–40 см. Через 1 мин. 50 сек. начинается новое наполнение канала и чаши водой. Температура быстро растёт. Наполнение длится 40 секунд. Далее, в течение 15–17 сек., идут сильные выплески воды с небольшим количеством пара. Затем уровень воды стабилизируется. Слышно «уханье» на глубине, свидетельствующее о схлопывании газово-паровых пузырей вследствие их конденсации в более холодной воде. В это время пузырей на поверхности воды в канале нет. Через 55 сек. появляются пузыри и еще через 12–13 секунд происходит первый «взрыв». Вода с паром выбрасывается на высоту 2–3 м, интенсивно идет заполнение чаши и через 45 сек. начинает течь ручей кипятка. Постоянно идут взрывы пара и выбросы воды на 1,5–2,0, иногда – до 3–4 м. Фаза извержения длится от 4 мин. 30 сек. до 4 мин. 45 сек. В период извержения изливается порядка 20 л/с воды с температурой 95–98 °С. Иногда перед концом извержения вода может быстро уйти на глубину 0,8 м в канале, а потом так же быстро поднимается со взрывом. И на этом извержение заканчивается.

В течение порядка 5 минут идет наполнение чаши гейзера водой с температурой 94–97 °С. Весь цикл процесса – от наполнения чаши водой до её опустошения длится порядка 9 мин. 30 сек. За время извержения на поверхность поступает порядка 6 тонн кипятка. Вероятно, эта цифра отражает объем резервуара подземной камеры. Судя по скорости подъёма перегретой воды, эта камера находится на небольшой глубине и выше уреза воды в озере.

Уникальность фреато-магматического извержения в кальдере и эволюция состава гидротерм

Фреато-магматическое подводное извержение 1996 г. в озере Карымском, заполняющем кальдере Академии Наук, оказалось уникальным явлением не только в связи с тем, что оно подтвердило возможность современных извержений в кальдерах и его удалось наблюдать от начала до конца события. Здесь были получены новые научные результаты по оценке степени катастрофизма, по динамике восстановления гидрохимических характеристик водного бассейна и по газовому составу новых термопроявлений. Важно, что фреато-магматическое извержение вызвало также активизацию гидротермальной деятельности в окрестностях озера и привело к возникновению новых выходов гидротерм, в том числе гейзера «Нового». Была получена принципиально новая информация о динамике потока летучих веществ на участках проявления гидротерм. Обнаружение повышенной гамма-активности в бомбово-шлаковом материале извержения (до 39 мкР/ч) и высокой активности радона (до 50 кБк/м³) в эманациях образовавшихся провальных воронок (Кузьмин, Андреев, Карпов, 2007), приуроченных к участкам трещиноватости, чётко контролируемых зоной растяжения субмеридианального простирания, позволяет сделать предположение о том, что трещины дренируют зону глубинной гидротермальной системы. Восходящие потоки газов выносят и радиоактивные элементы. Об этом свидетельствуют следы урана и тория, а также наличие свинца в водах гейзера «Нового». В свободных газах источников Академии Наук объёмная активность радона на протяжении 6 лет после извержения превышала 100 кБк/м³. По-видимому, гейзеры возникали здесь и в периоды прошлых подводных извержений. Это подтверждают и данные о высоком содержании свинца в отложениях старого гейзерита. Предполагается, что свинец был результатом конечных продуктов распада урана и тория (Вергасова, Карпов и др., 1988).

Роль CO₂ в извержениях гейзеров

В процессе подводного извержения по разломной зоне на поверхность поступали кислые газы – SO₂ и H₂S. После извержения в составе газов основное место заняли CO₂ и N₂. Наши данные о высоком содержании углекислого газа в составе свободных газов гейзера «Нового» (до 78 % CO₂) могут служить подтверждением представления (J.S.Rinehart, 1980) о том, что приток этого неконденсируемого газа приводит в гейзерах и пульсирующих источниках к импульсному повышению температуры растворов и к извержению (Kiryukhin, 2016, Kiryukhin, Karov ,2020) Именно CO₂ является наиболее высоко-энтальпийной фазой флюида, питающего высокотемпературные гидротермальные системы. Степень обогащения этим газом близповерхностных подземных камер гейзеров и его импульсный прорыв наверх при критическом наполнении камер газами и обуславливают режим работы гейзеров.

Список литературы

1. *Базанова Л.И.* Вулкан Академии Наук / *Л.И. Базанова* // Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура). М. Наука, 1980. С 195–197. 300 с.
2. *Брайцева О.А.* Фреатомагматическое извержение в озере Карымское (Восточная Камчатка – 6500¹⁴-С лет назад и импульсы подачи базальтового вещества в районе Карымского вулкана в голоцене / *О.А. Брайцева* // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С.138–144.
3. *Вакин Е.А.* Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. / *Е.А. Вакин, Г.Ф. Пилипенко* // Вулканология и сейсмология. 1998. №2. С. 3–26.

4. *Вергасова Л.П.* Постэруптивная деятельность в кальдере Академии Наук (Камчатка): минеральные новообразования, содержание радона в спонтанных газах и биотические изменения / *Л.П. Вергасова, Г.А. Карпов, Е. Г. Лупкина и др.* // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 2. С. 49–65.

5. *Иванов Б.В.* Современная гидротермальная деятельность в районе вулканов Карымской группы / *Б.В. Иванов* // *Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма*. Новосибирск. Наука, 1974. С. 32–37.

6. *Кузьмин Д.Ю.* Спонтанные газы термальных источников кальдеры Академии Наук / *Д.Ю. Кузьмин, В. И. Андреев, Г.А. Карпов* // *Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога Петропавловск – Камчатский*, 2007. С. 227–235.

7. *Троицкий В.Д.* Краткий геоморфологический очерк района Карымского вулкана / *В.Д. Троицкий* // *Труды Камчатской вулканологической станции*. М.-Л., 1947. Вып. 3. С. 49–67.

8. *John S. Rinehart* Geysers and Geothermal Energy / *John S. Rinehart* // Springer Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1980. 223 p.

9. *Kiryukhin A.* A CO₂-Driven Gas Lift Mechanism in Geyser Cycling (Uzon Caldera, Kamchatka) / *Karpov* // *G. Geosciences*. 2020. Vol. 10. № 5. P. 180. DOI: 10.3390/geosciences10050180

10. *Kiryukhin A.* Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2016. No. 323. P. 129–147.

УДК 549.01

Changes in the Mineral and Elemental Composition of Geyserite Deposits from 2018 to 2021

Anastasia Sergeeva, Alexey Kiryukhin, Nikita Zhuravlev, Tatiana Rychkova, Elena Kartashova, Maria Nazarova

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
anastavalers@gmail.com*

This work investigates the mineral and elemental composition of geyserite deposits formed on loggers, each of which was used to track temperature for six months, for the period from 2018. Loggers were used in geysers Velikan (Valley of Geysers, Kamchatka, RF) and Shaman (Uzon caldera, Kamchatka, RF). A decrease in the zeolite content and an increase in the opal component was found for Velikan geyser; at the same time, the geyserite deposits became amorphous. Bromine and chlorine are fixed in the sediments. For Geyser Shaman, silica content in the sediments is high and does not change appreciably, bromine and chlorine are fixed in the elemental composition.

Keywords: geyser, geyserite, zeolites, logger, hydrothermal system

Изменения минерального и элементного состава гейзеритовых отложений за период 2018–2021 гг.

А.В. Сергеева, А.В. Кирюхин, Н.Б. Журавлев, Т.В. Рычкова, Е.В. Карташова, М.А. Назарова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

В работе исследован минеральный и элементный состав гейзеритовых отложений, сформировавшихся на логгерах, каждый из которых использовался для отслеживания температуры в течение полугода, за период с 2018 года. Логгеры использовались в гейзерах Великан (Долина Гейзеров, Камчатка, РФ) и Шаман (кальдера Узон, Камчатка, РФ). Для гейзера Великан обнаружено снижение доли цеолитов и возрастание доли опаловой компоненты, одновременно с этим гейзеритовые отложения становятся аморфными. В составе отложений фиксируется бром и хлор. Для гейзера Шаман содержание кремнезема в составе отложений высокое и не претерпевает заметных изменений, а в элементном составе также фиксируется бром и хлор.

Ключевые слова: гейзер, гейзерит, цеолиты, логгер, гидротермальная система

Введение

Состав гейзеритовых отложений отражает гидрогеохимический режим гейзеров. Изменение в составе термоминеральных растворов приводят к изменению минерального состава осадков, поэтому исследование отложений позволяет реконструировать условия на изливке. В настоящей работе приводятся данные по изучению минерального и элементного состава отложений, сформированных на логгерах, контактировавших с растворами гейзеров Великан и Шаман, расположенных в Долине Гейзеров и кальдере Узон соответственно. Каждый логгер записывал температуру через заданные промежутки времени, и находился в гейзере примерно полгода, а исследование в рамках работы охватывает период с 2018 г. Гейзер Великан извергает щелочной раствор с рН около 9, в то время как извергаемая вода гейзера Шаман имеет близнеутральный до слабокислого рН.

Ранее было установлено, что на устье гейзеров формируются плащи преимущественно цеолитового состава, что объясняется щелочной средой извергаемых растворов (Kiryukhin, 2020; Sergeeva, 2019). Щелочная среда обусловлена присутствием ионов карбоната и гидрокарбоната. Ввиду той роли, которую играет углекислый газ в извержениях, изменения в содержании его форм в растворе приводит к изменению режима извержений, и отражается на рН растворов, следовательно, на составе отложений. Поэтому целью работы было отслеживание изменений в составе гейзеритовых отложений на логгерах.

Методы исследования

Образцы отложений были исследованы методами рентгеновской дифрактометрии (XRD 7000, Shimadzu), инфракрасной спектроскопии (IRAffinity-1, Shimadzu) и рентгеновской флуориметрии (S4 Pioneer, Bruker Axs). Все исследования проведены на базе Аналитического Центра ИВиС ДВО РАН.

Результаты и обсуждения

На рисунке 1 показан типичный пример логгера, зарастающего гейзеритовыми отложениями за полугодовой срок использования в среде термоминеральных вод гейзера. Минеральный состав гейзерита показан на рисунке 2, в таблице 1 приведены данные по элементному составу.

В гейзеритах Великана постепенно повышается содержание кремнезема, одновременно с этим закономерно возрастает доля аморфного кремнезема, а содержание цеолитов снижается. В 2018 году отложения состояли преимущественно из цеолитов (гейландит, клиноптилолит, морденит), а рН растворов лежал в пределах 9–10. Постепенное снижение доли цеолитов может быть связано с некоторым снижением показателя кислотности и/или возрастанием концентрации кремнезема в растворах. Стабильно фиксируются

повышенные концентрации хлора, что связано с высоким содержанием хлорида натрия в водах. Содержание брома в отложениях нестабильно и отражает колебания его концентраций в водах.



Рисунок 1 – Логгер гейзера Великан, покрытый отложениями

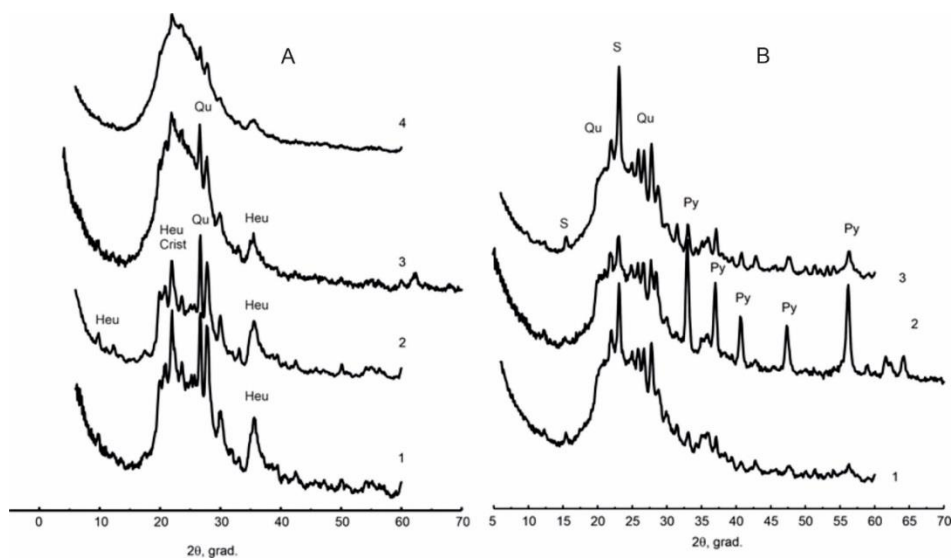


Рисунок 2 – (А) отложения гейзера Великан, полученные в мае 2018 (1), сентябре 2019 (2), мае 2020 (3), сентябре 2020 (4); В – отложения гейзера Шаман, полученные в мае 2018 (1), мае 2020 (2), сентябре 2020 (3); Heu – гейландит, Py – пирит, S – сера, Crist – низкотемпературный кристобалит

Таблица 1. Содержание элементов в гейзеритовых отложениях

Образец, гейзер, год	Содержание элемента							
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ + FeO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	Cl (ppm)	Br (ppm)
Шаман, 2019	59.5	0.12	5.7	6.3	0.6	0.2	1660	396
Шаман, 2020	62.6	0.1	6.6	2.5	0.5	0.2	765	6090
Великан, 2018	45.5	< 0.1	1.5	1.4	0.4	0.1	1410	11
Великан, 2019	61.8	0.3	11.7	5.0	1.0	0.6	1450	45
Великан, 2020	75.9	< 0.1	2.5	1.7	0.5	0.3	1860	14000

В составе отложений гейзера Шаман присутствует сера, пирит, кварц, встречается небольшое количество каолинита и алунит-ярозитовых минералов. Показатель кислотности термоминеральных вод Шамана от близнейтрального до слабокислого, что отличает его от гейзеров Долины Гейзеров. За исследуемый период закономерностей в изменении минерального состава отложений не обнаружено, содержание кремнезема составляет около 60 %. Содержание пирита возрастает в зимних отложениях 2020 года, при том же качественном составе. Так же в составе фиксируется хлор, присутствие которого объясняется наличием хлорида натрия в воде, и бром, содержание которого нестабильно. Условия гейзера Шаман ближе к грязе-водным котлам и пульсирующим источникам, и заметных изменений не претерпевают. Между тем, изменения в содержании брома для обоих гейзеров может объясняться динамикой соотношений глубинных и метеорных вод в составе извергаемых растворов.

Заключение

В составе отложений гейзера Великан происходит постепенное снижение доли цеолитов, для образования которых благоприятны щелочные условия, и возрастание доли аморфного кремнезема. Содержание хлора стабильно высокое, а бром встречается не всегда, что отражает динамичное соотношение глубинных и метеорных вод. Отложения гейзера Шаман больше напоминают минеральные ассоциации грязевых котлов и пульсирующих источников. В течение указанного срока, заметных закономерных изменений в составе не происходит. Содержание хлора и брома нестабильно, что так же свидетельствует о нестационарной динамике в соотношении глубинных и метеорных вод.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21-55-50003 ЯФ_а «Магматический фрактинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА-А20-120121090010-7.

Список литературы

1. *Sergeeva A., Kiryukhin A.* Secondary minerals in the geysers of the Geysers Valley (Kamchatka) / *A. Sergeeva, A. Kiryukhin* // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2019. V. 98. P. 08019.
2. *Kiryukhin A.V.* Simulating the Conditions of Generation for Permeable Geyser Channels in Areas of Acid Volcanism / *A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, A.V. Sergeeva* // Journal of Volcanology and Seismology. 2020. V. 14. pp. 71–82.
3. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

TOUGH2-EOS1 modeling of the effect of infiltration into a two-phase geyser reservoir on the dynamics of natural discharge of hydrotherms

Olga Usacheva

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
lel89@yandex.ru*

TOUGH2-EOS1 modeling used to explain decrease of thermal discharge during snowmelt in Valley of Geysers, Kamchatka. Used two dimensional model generated in PetraSim v. 5.2. with two-phase reservoir (water + steam). Decrease of thermal discharge 5–7 % obtained by infiltration of cold water into two-phase reservoir. This result caused by the effect of "vacuuming".

Keywords: infiltration, two-phase reservoir, «vacuuming», Valley of Geysers, Kamchatka

TOUGH2-EOS1 моделирование влияния инфильтрации в двухфазный Гейзерный резервуар на динамику естественной разгрузки гидротерм

О.О. Усачева

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

В работе предпринята попытка объяснить снижение разгрузки глубинной составляющей, наблюдаемого в Долине Гейзеров в период снеготаяния. Для этого на двухмерной модели, построенной с использованием программы PetraSim, задается инфильтрация холодной воды в область резервуара с двухфазными условиями (пар+вода). В результате моделирования получено снижение разгрузки на 5–7 %, являющееся следствием эффекта "вакуумирования" в области двухфазного резервуара.

Ключевые слова: инфильтрация, двухфазный резервуар, «вакуумирование», Долина Гейзеров, Камчатка

Введение

Исследованиями, проведенными на гейзерных полях Йеллоустонского национального парка (McCleskey, 2012) и Долины Гейзеров (Кирюхин, Рычкова, Дубинина, 2015; Рычкова, 2020а), были выявлены сезонные изменения глубинной составляющей термальной разгрузки.

В Долине Гейзеров это изменение составляет 31 % (уменьшается в паводок). Задача исследования: оценить возможную связь между изменениями естественной разгрузки источников и инфильтрацией холодной воды в двухфазный резервуар на примере профильной двухмерной модели Долины Гейзеров.

Динамика естественной разгрузки гидротерм

Для расчета глубинной составляющей разгрузки Q_d в речной воде используется следующая формула, полученная из соотношений массового баланса:

$$Q_d = \frac{Q_r(Cl_r - Cl_b)}{C_d} \quad (1)$$

где Q_r (л/с, или м³/с) – расход реки, Cl_r – концентрация хлор-иона в речной воде (мг/л), Cl_b – фоновое содержание хлора (мг/л), C_d – концентрация хлора в глубинных водах гидротермальной системы (мг/л).

Расход реки Гейзерной определяется по уровню воды в реке, который, в свою очередь, автоматически регистрируется парой логгеров НОВО U20–001–04 с заданным интервалом измерений 20–30 мин. (один регистрирует барометрическое давление, другой, будучи размещенным в реке, регистрирует давление водяного столба и атмосферного давления). Формула зависимости уровень воды в реке – расход воды была откалибрована по результатам измерений расхода с использованием прибора Mainstream 400P. Доплеровский расходомер Mainstream 400P, предназначенный для измерений и записи потоков в открытых руслах, измеряет фактическую среднюю скорость реки (точность 1 см/с, диапазон от 1 см/с до 5 м/с) (Рычкова, 2021).

Q_d оценивается хлоридным методом (1) на наблюдательных поперечных профилях в устье р. Гейзерная. Логгер НОВО U24-001 (диапазон 0–10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ с заданными интервалами записи от 1 до 20 мин.) используется для непрерывной регистрации электропроводности раствора в реке. Электропроводность раствора позволяет одновременно оценивать изменения концентрации хлор-иона и, как следствие, динамику изменения величины скрытой разгрузки и тепловой мощности гидротермальной системы. Преобразование проводимости раствора в концентрацию хлора в наблюдательных поперечных профилях выполняется с использованием формулы (Кирюхин, личное сообщение 2021):

$$Cl = -3,461 \times T + 0,254 \times C + 31,451 \quad (2)$$

где Cl – концентрация хлора, мг/л; T – температура, °C; C – электропроводность, $\mu\text{S}/\text{cm}$.

В результате измерений было выявлено снижение глубинной составляющей в Долине Гейзеров на 31 % в период паводков (Рис. 1).

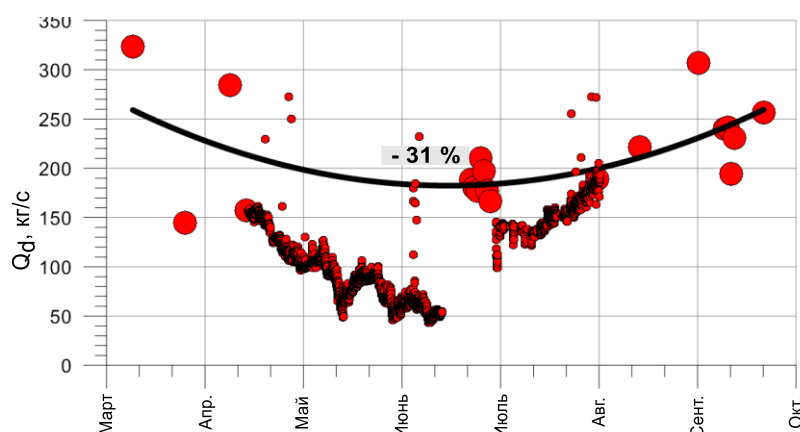


Рисунок 1 – Изменение разгрузки термальной глубинной компоненты (Q_d , кг/с) в годовом гидрологическом цикле по данным измерений на створе р. Гейзерная, Долина Гейзеров (Кирюхин, Рычкова, Дубинина, 2015, Рычкова, 2020а)

Моделирование инфильтрации в двухфазный резервуар

Для построения модели используется программа PetraSim – графическое приложение к семейству программ TOUGH2. Описывается двумерная профильная модель Долины Гейзеров, включающая Верхне-Гейзерное и Нижне-Гейзерное поля, Гейзерный резервуар (Рис. 2) (Кирюхин, 2018; Рычкова, 2020b; Кирюхин, 2020).

На верхней границе резервуара в районе Верхне-Гейзерного поля заданы двухфазные условия, наличие которых отмечается в работе (Кирюхин, 2012). Модель состоит из 4508 элементов. На поверхности задана граница с фиксированными значениями давления и температуры (1,5 Бар и 10 °C соответственно). В модели так же заданы 14 скважин, работающих в режиме самоизлива с индексом продуктивности $PI = 1e-12 \text{ м}^3$ и давлением $P = 2e5 \text{ Па}$ (2 Бар) и $P = 1e5 \text{ Па}$ (для скважин 56 и 3 на границах модели). Для описания резервуара используются 4 материала. Основная часть резервуара – материал RESER с проницаемостью по X и Y – $5e-12 \text{ м}^2$, по координате Z – $1e-13 \text{ м}^2$. Материалы CAPRK и capr2 используются для описания водоупорных пород низкой проницаемости на поверхности модели (проницаемость $2e-15 \text{ м}^2$ и $1e-17 \text{ м}^2$ соответственно). Материал UPFLO с высокой проницаемостью ассоциируется с источниками в подошве модели. Источники – это заданные притоки воды и трассера с

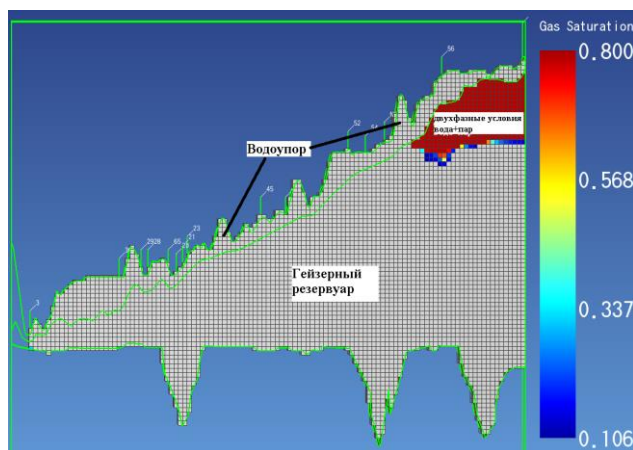


Рисунок 2 – Профильная двухмерная модель Гейзерного резервуара

общим расходом 260 и 234 кг/с соответственно. Энтальпия воды – $5,04 \times 10^5$ Дж/кг, соответствует температуре 120 °С. Инфильтрация холодной воды с энтальпией 42 кДж/кг (соответствует температуре 10 °С) задавалась в период с мая по октябрь, в остальные месяцы расход холодной воды 0 кг/с. Таким образом, была воспроизведена сезонность, наблюдаемая в Долине Гейзеров.

Задача: оценить влияние притока холодной воды в двухфазный резервуар на режим скважин на самоизливе. Для этого были просчитаны различные варианты с переменными параметрами – расположением элементов, куда поступает холодная вода в пределах двухфазного резервуара, и величиной притока воды. Время моделирования – 10 лет. Варианты моделирования, имеющие наибольшую сходимость с наблюдаемыми значениями, приведены в таблице (Таблица. 1).

Таблица 1. Варианты моделирования притока холодной воды в двухфазный резервуар, имеющие наибольшую сходимость с фактическими данными

Вариант моделирования	Суммарный расход метеорной воды (кг/с)	Количество ячеек с заданным притоком холодной воды	Изменение расхода гейзеров (%)	Расположение ячеек с заданной инфильтрацией
12	52,5	21	7	8-й сверху слой двухфазной области
10	42	21	5	8-й сверху слой двухфазной области
9	42	21	5	7-й сверху слой двухфазной области

Выводы

На модели было воспроизведено снижение естественной разгрузки термальных источников на 7 %, посредством задания инфильтрации холодной воды в двухфазный резервуар. Так же оценена чувствительность модели к переменным параметрам. Выявлено, что поступление метеорной воды в более глубокую часть двухфазного резервуара с расходом от 24 до 46 кг/с, вызывает линейное увеличение расхода скважин. Наиболее удовлетворительные значения изменения термальной разгрузки в гидрологическом годовом цикле получены при задании инфильтрации в «среднюю» часть двухфазного резервуара (варианты моделирования № 12, 10, 9). В этих случаях наблюдается характерный «прогиб» графика в период паводка, с разницей в значениях 5–7 % (Рис. 3).

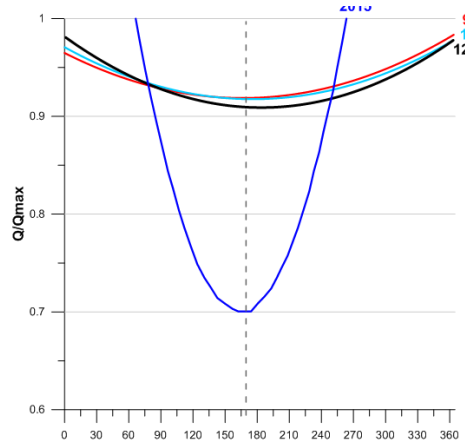


Рисунок 3 – Нормированные графики значений естественной разгрузки по результатам моделирования (12, 10, 9) и наблюдаемые значения глубинной составляющей в р. Гейзерной, аппроксимированные квадратичным полиномом

Следует пояснить, что модельные значения глубинной составляющей могут быть завышены, учитывая, что воды гейзеров на модели включают как глубинную составляющую, так и метеорную воду. Наиболее существенно на инфильтрацию реагируют скважины, расположенные в непосредственной близости к области двухфазных условий. Наблюдаемый на модели эффект можно объяснить таким физическим явлением, как «вакуумирование». При охлаждении пар конденсируется, в двухфазном резервуаре появляется пустое пространство, ранее занятое паром. Вследствие этого понижается давление, и в область пониженного давления начинает поступать вода из резервуара, тем самым снижая расход в гейзерах в период паводка.

Заключение

При задании модуля состояния EOS1 на профильной модели Долины Гейзеров и инфильтрации холодной воды с расходом 42–52,5 кг/с (варианты моделирования 12, 10, 9) в двухфазный резервуар наблюдается снижение естественной разгрузки термальной воды на 5–7 % в период снеготаяния (апрель – октябрь). Модельные значения, возможно, завышены – учитывая, что в состав гейзеров на модели, помимо «родительского флюида», включена метеорная вода.

Воспроизведение снижения разгрузки «источников» на 31 % (наблюдаемое значение в р. Гейзерной) – задача для дальнейших исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ_а «Магматический фракинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА–А20–120121090010–7.

Список литературы

1. *Кiryukhin A. V.* Анализ гидрогеологического режима ГТС Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 / *A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, E.O. Dubinina* // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 20–30.
2. *Рычкова Т.В.* Хлоридный метод оценки тепловой мощности гидротермальных систем / *Т.В. Рычкова, О.О. Усачева, А.В. Кiryukhin, А.Ю. Поляков* // Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН; 2021. С.145–148.
3. *Рычкова, Т. В.* Моделирование условий функционирования гейзеров под воздействием Подпрудного озера-2 (Кроноцкий заповедник, Камчатка) / *Т.В. Рычкова, О.О. Усачева* // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020), Петропавловск-Камчатский, 03–08 сентября 2020 года. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 106–110.
4. *Рычкова Т.В.* Гидрогеологический анализ условий формирования и функционирования гейзеров (на примере гидротермальных систем Камчатки): автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / *Т.В. Рычкова*; рук. работы *А.В. Кiryukhin*; ИВиС ДВО РАН. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2020 19 с.
5. *Kiryukhin A.V.* Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide / *A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, I.K. Dubrovskaya* // Applied Geochemistry. 2012. V. 27. pp. 1753–1766.
6. *Kiryukhin A.V.* Geysers Valley CO₂ Cycling geological Engine (Kamchatka, Russia) / *A. Kiryukhin, V. Sugrobov, E. Sonnenthal* / *A.V. Kiryukhin* // Geofluids Journal. 2018. V. 2018. P.

17 URL: <https://www.hindawi.com/journals/geofluids/aip/1963618/> (Дата обращения: 28.05.2021).

7. *McCleskey, R.B.* Solute and geothermal flux monitoring using electrical conductivity in the Madison, Firehole and Gibbon rivers, Yellowstone National park / *R.B. McCleskey et al.* // *Applied Geochemistry*. 2012. V. 27. pp. 2370–2381.

8. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи. 2020. 431 с.
URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45739830_67113473.pdf

УДК 556.3

Cyclicity eruptions of the Bolshoi geyser in 2020–2021 (Kronotsky Reserve, Kamchatka)

Tatiana Rychkova

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

The paper considers and interprets the data obtained by the НОВО U12-015 temperature logger at the Bolshoi geyser in the period from April 2020 to May 2021.

Keywords: geysers, IBE, multiphase fluids, pressure, temperature

Цикличность извержений гейзера Большого в 2020–2021 гг.

Т.В. Рычкова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

В работе рассматриваются и интерпретируются данные, полученные температурным логгером НОВО U12-015 на гейзере Большом в период с апреля 2020 г. по май 2021 г.

Ключевые слова: гейзеры, IBE, многофазные флюиды, давление, температура

Введение

Гейзеры – это горячие источники, демонстрирующие частые циклические извержения горячей воды и неконденсируемых газов CO₂ и N₂. Строение системы гейзера похоже на строение вулкана, процесс извержения как одних, так и других, включает образование и расширение газовых пузырей. Гейзеры демонстрируют большую вариабельность взрывов, вызванных пузырьками, и интервалов извержений, что похоже на извержение вулканов стромболианского типа (Eva and Eibl et al., 2020). По аналогии работы гейзеров и вулканов, изучение динамики и взаимозависимостей извержений гейзеров может улучшить понимание работы вулканов (Hurwitz and Manga, 2017). Гейзеры имеют небольшие размеры и извергаются чаще, чем вулканы, что упрощает изучение их периодичности (Hurwitz and Shelly, 2017). Периодичность извержений гейзеров – это интервал между их извержениями (IBE – the interval between eruption). Время ожидания между извержениями колеблется от постоянного до нерегулярного, бимодального, или хаотического (Wang and Manga, 2010). Частота извержений гейзеров связана с динамикой многофазных флюидов в каналах и резервуарах. На динамику извержения гейзера может повлиять изменение давления и температуры (Munoz-Saez et al., 2015).

Данные, полученные в период с апреля 2020 г. по май 2021 г.

Непрерывный мониторинг извержений основных гейзеров камчатской Долины гейзеров проводится с 2007 г. За период наблюдений гейзеры Большой и Великан, являющиеся визитной карточкой Долины гейзеров, показывают значительные изменения в периодичности извержений, которые, вероятно, обусловлены влиянием обвала-оползня, произошедшего на руч. Водопадном 3.06.2007 г. и сходом селя в верхнем течении р. Гейзерной 3.01.2014 г. В связи с этим, для количественной оценки изменчивости извержений гейзеров, мы используем автономные логгеры НОВОУ12-015 (США), обеспечивающие получение непрерывных данных в течение длительного периода времени по температуре в каналах гейзеров и ИВЕ. В данной работе обсуждаются результаты, полученные на гейзере Большом в период с апреля 2020 г. по май 2021 г.

Методика измерений цикличности гейзеров

Температурные логгеры НОВОУ12-015 являются современными высокоточными техническими средствами, позволяющими программировать запись измерений температуры с интервалом в 5 мин. Начиная с 2007 г. логгеры устанавливаются в каналах гейзеров на уровне изливающейся воды, что позволяет однозначно определять время извержения гейзеров по абсолютному максимуму температуры перед ее абсолютным минимумом в цикле извержения (Рис. 1).

Программа G-PERIOD и методика обработки данных

Полученные данные по режиму извержений гейзера Большого в вышеназванный период, обработаны с целью исключения «шума» с помощью программы G-PERIOD. Программа разработана А.В. Кирюхиным и используется для расчета ИВЕ гейзеров с 2007 года. Учитывая то, что за последний период наблюдений, так же, как и за всю историю наблюдений, гейзер Большой показывает относительно регулярный режим извержений, для расчета ИВЕ программой G-PERIOD мы используем фактическую температуру, записанную логгерами. При расчете программа использует два критерия: а) максимум температуры и б) возрастание температуры более чем на 20 °С за последние 10 мин. перед извержением, что рассмотрено на графике четырех циклов извержения (Рис. 1). Величина 20 °С рассчитана эмпирически.

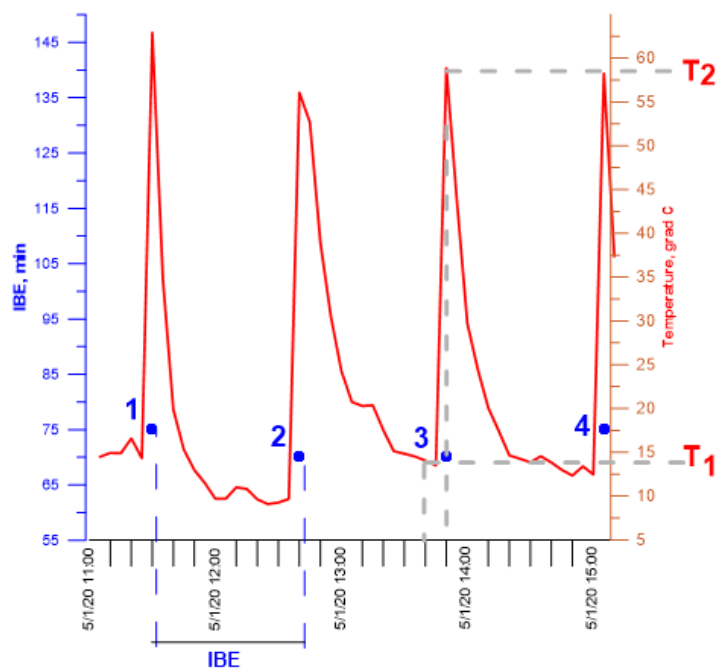


Рисунок 1 – Принцип расчета ИВЕ программой G-PERIOD. Красная линия – это температура воды. Буквенное обозначение T1 показывает температуру за 10 мин до извержения, T2 – температуру во время извержения. Расстояние между синими точками – это временной интервал между извержениями (ИВЕ)

Результаты, полученные по гейзеру Большому

До 2007 г. по данным измерений (Дроздин В.А. 2007 г. устное сообщение) с августа по октябрь 2003 г., средний ИВЕ гейзера Большого составлял 108 мин (1,5 ч). За период наблюдений с 2007 по 2013 гг. – составил 63 мин. После схода селя в 2014 г. его ИВЕ снизился до 30 мин., затем (до сентября 2014 г.) стабилизировался и составил 44 мин.

Результаты анализа 7178 данных по распределению ИВЕ с мая 2020 г. по апрель 2021 г. показали, что на общем фоне регулярных извержений, наблюдаются три даты с аномальным ИВЕ: это 15.11.2020 г. с 8:40 до 12:25 (225 мин.); 14.06.20 с 13:40 до 16:05 (145 мин.); 02.08.20 с 14:45 до 17:10 (145 мин.) (Рис. 2а). Распределение ИВЕ гейзера Большого за это же время, но без учета аномального значения ИВЕ (225 мин.), имевшего место в период самых частых извержений гейзера, показано на рис. 2б.

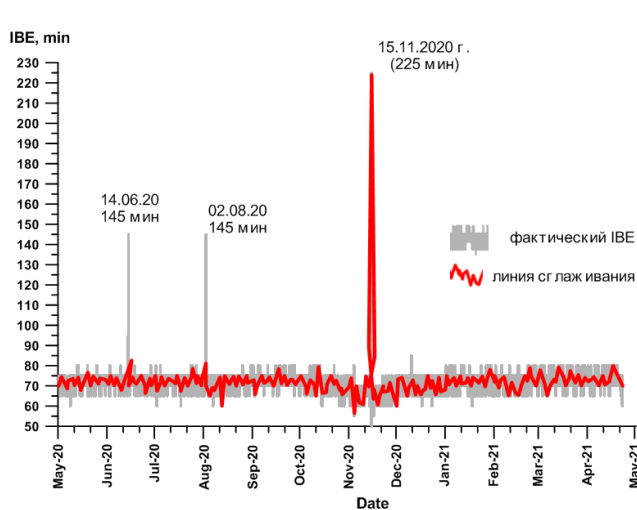


Рисунок 2а – ИВЕ гейзера Большого за период наблюдений с мая 2020 г. по апрель 2021 г.

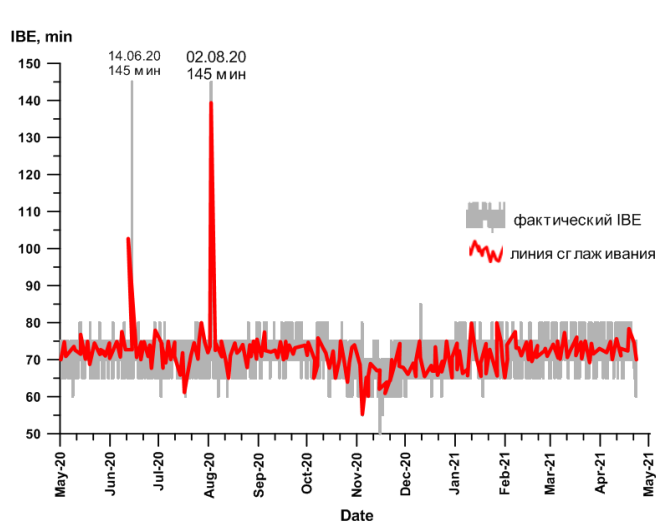


Рисунок 2б – ИВЕ гейзера Большого за период наблюдений с мая 2020 г. по апрель 2021 г. (исключен ИВЕ, равный 225 мин.)

Анализ ИВЕ гейзера Большого в годовом гидрологическом цикле показывает, что за анализируемый период времени большинство извержений гейзера происходит во временном интервале 65–75 мин. (Рис. 3). Очевидно также то, что ИВЕ отличается относительной регулярностью независимо от сезона, средняя аппроксимирующая кривая имеет максимум в апреле-мае и минимум в ноябре – декабре (разница составляет 5 мин.). Средний ИВЕ гейзера Большого составляет 70 мин. (1 ч 10 мин.).

Обсуждения

Редкие случаи аномального ИВЕ заслуживают отдельного рассмотрения с точки зрения зависимости от метеорологической и сейсмической обстановки. Метеорологическая обстановка анализировалась по данным архива погоды в Петропавловске-Камчатском (<https://petropavlovsk-kamchatskiy.nuipogoda.ru/2-августа#2020>), по данным архива Главного управления МЧС России, по архивным данным по метеоусловиям в аэропорту Петропавловска-Камчатского (https://rp5.ru_METAR). Данными конкретно по метеостанции Семячик (ближайшей к объекту исследования и действующей в настоящее время) мы не располагаем. Для анализа сейсмической обстановки использованы данные КФ ФИЦ ЕГС РАН. URL: <http://sdis.emsd.ru/main.php>, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>). С целью выявления связи аномальных ИВЕ с землетрясениями, мы проанализировали возможное влияние сейсмических событий, произошедших в квадрате с координатами 159-161° в.д. и 53.6–54.6° с.ш. (исходя из ближайших временных дат) на ИВЕ гейзера Большого (Рис. 4). Для расчета атмосферного

давления в Долине гейзеров использовано давление, измеренное в районе аэропорта (а.о. +40.5м) с учетом барической ступени и а.о. гейзера Большого (423 м).

Что касается двукратного превышения **IBE 02.08.20 г. с 14:45 до 17:10**, то архивные данные свидетельствуют о том, что аномальных погодных условий не было. Анализ сейсмических данных показывает отсутствие во временном и площадном интервале землетрясений, имевших потенциал влияния на IBE.

Второй случай **14.06.20 г. с 13:40 до 16:05**. Архивные данные также показывают благоприятные погодные условия. В то же время, если рассматривать удлинение IBE как возможный результат изменения деформационно-упругих напряжений горных пород перед землетрясением, то данные по сейсмичности показывают событие, которое, вероятно, могло оказать влияние на IBE гейзера (Рис. 5). Это событие 16.06.2020 г. в 12:46 с магнитудой 3,7 (класс 8,9), на глубине 143.6 км.

О затянувшихся IBE, как реакции на сейсмические события, часто упоминается в зарубежных (Rojstaczeretal., 2003; Reedetal., 2021; Rojstaczer, Wolf, 1992) и отечественных (Сугрובה, 1952; Набоко, 1954; Устинова, 1955; Рычкова, 2020) публикациях. Поэтому, перерыв в извержениях, равный 225 мин., произошедший **15.11.20 с 08:40 до 12:25** также рассматривался в связи с сейсмическими событиями, произошедшими в исследуемом квадрате. Рассматривались все землетрясения, попавшие в этот квадрат независимо от магнитуды (М 2,6–3,5) и глубины эпицентра (6,3–173 км) (Рис. 6). В результате установлено, что землетрясение, предшествующее увеличенному (225 мин.) IBE, произошло **12 ноября 2020 г. в 03:52** (на рисунке обозначено № 12, М 2,65, глубина 43,4 км), а последующее – **21 ноября 2020 г. в 00:35** (на рисунке обозначено № 6, М 3,05, глубина 120,5 км). Вероятной является связь этих землетрясений с разломом 131, одним из 157 сейсмогенных разломов, находящихся на восточном шельфе Камчатки между береговой линией и глубоководным желобом и выполняющих ключевую роль в подвижках земной коры (Кирюхин, 2020). Но предварительные расчеты расстояния от гипоцентров вышеназванных землетрясений до плоскости разлома этой связи не подтвердили, что требует дополнительного изучения.

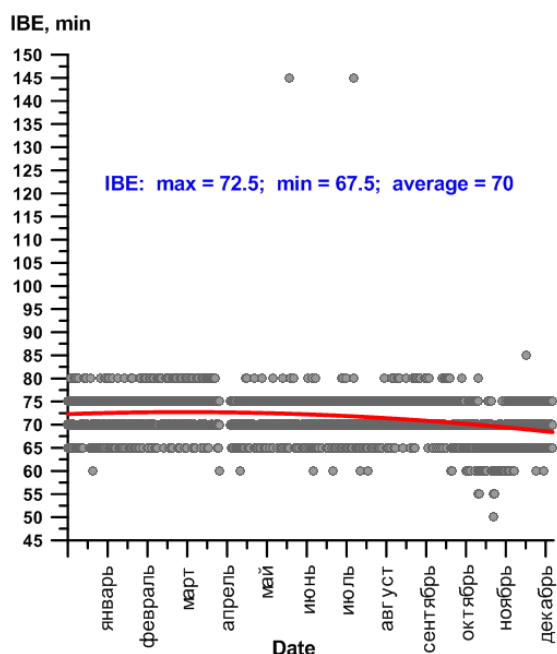


Рисунок 3 – Распределение IBE гейзера Большого в годовом гидрологическом цикле



Рисунок 4 – Местоположение гейзера Большого квадрат с координатами 159–161° в.д. и 53.6–54.6° с.ш. на карте Камчатки

Наряду с этим, архивные метеорологические данные показывают, что 15.11.2020 г. в целом была облачная погода с прояснениями: мокрый снег с дождем, ветер от умеренного до сильного. В целом, начиная с 12 ноября, и заканчивая 16 ноября, погода была дождливой, со

скоростью ветра - от легкого до сильного (от 2 до 15 м/с), влажностью воздуха – 79–100 %; минимальное атмосферное давление в Долине гейзеров составляло 718.45, максимальное – 723,15 мм рт. ст. Можно предположить, что затянувшийся на 3 ч 45 мин. интервал между извержениями был реакцией на сильные осадки преимущественно в виде дождя и снега в восточных районах Камчатки. Но в более ранних исследованиях (Кириухин, Рычкова, Дубинина, 2015) было показано, что ИВЕ гейзера Большого мало реагирует на осадки, поскольку гейзер Большой является гейзером-конусом, и его постройка защищает воду в канале от сильного охлаждения.

Исследование цикличности извержений гейзера Большого продолжается в настоящее время. На момент написания статьи, в августе 2021 г., были получены результаты видеосъемки работы гейзера, изучение которых показывает увеличение ИВЕ от 70 до 79 мин.

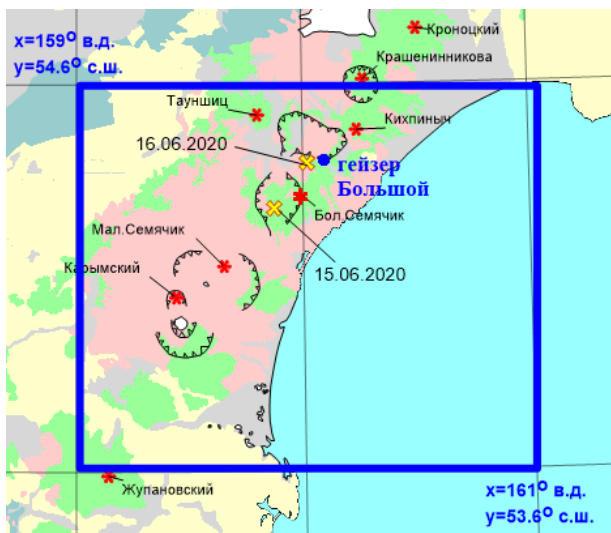


Рисунок 5 – Сейсмические события 16.06.20 и 15.06.20, попавшие в квадрат исследования, одно из которых, возможно, оказало влияние на ИВЕ гейзера Большого 14.06.2020 г.

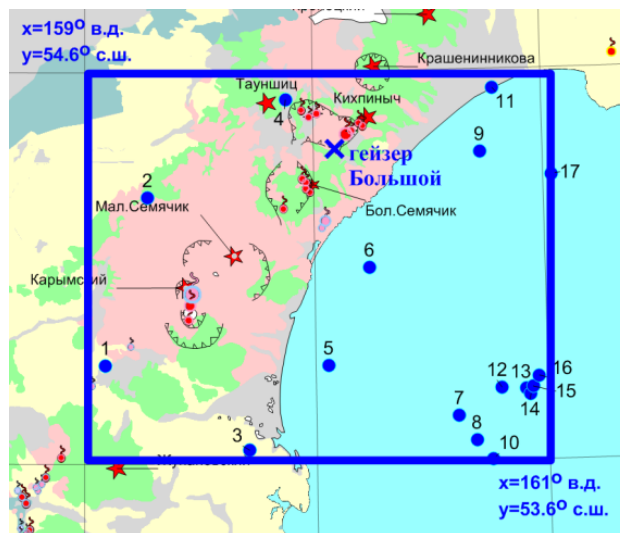


Рисунок 6 – Сейсмические события, попавшие в квадрат исследования, и не оказавшие влияния на ИВЕ гейзера Большого 15.11.2020 г.

Выводы

1. Расчетные ИВЕ показывают в целом регулярный режим извержений гейзера Большого в период с мая 2020 по апрель 2021 гг.
2. Распределение ИВЕ в годовом гидрологическом цикле показывает, что за анализируемый период времени большинство извержений гейзера происходит во временном интервале 65–75 мин. с максимумом в апреле-мае и минимумом в ноябре – декабре (разница составляет 5 мин.).
3. Аномальный период ИВЕ 14.06.20 г. связан с подготовкой к землетрясению 16.06.2020 г. (М 3,7); ИВЕ, равный 225 мин. 15.11.2020 г. требует дополнительного изучения взаимосвязи с региональной сейсмичностью (данные локальной сейсмичности отсутствуют в связи с отсутствием сейсмостанций в р-не Долины гейзеров и влк. Кихпинич).

Задачи дальнейших исследований

1. Аномальные ИВЕ 14.06.20 г. и 02.08.20 г. требуют дальнейшего исследования возможной связи с паводком в июне и дождями в августе.
2. Дополнительное изучение вопроса взаимосвязи ИВЕ гейзера Большого с региональной сейсмичностью.
3. Исследование возможной связи гейзера Большого с определенными метеоусловиями не смотря на то, что он является гейзером-конусом?
4. Выяснение вопроса почему, в отличие от гейзера Великана, распределение ИВЕ гейзера Большого в годовом гидрологическом цикле показывает обратную картину: незначительно увеличивается летом и чаще извергается зимой?
5. Как влияет расход р. Гейзерной на ИВЕ гейзера Большого?

Автор выражает благодарность А.В. Кирюхину за постановку задачи, предоставление исходных данных и программы для расчета ИВЕ гейзера Большой, обсуждение полученных результатов; Н.Б. Журавлеву за консультации по применению ПО. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ_а «Магматический фракинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и проектом ИВиС ДВО РАН АААА–А20–120121090010–7.

Список литературы

1. Кирюхин А.В. Анализ гидрогеологического режима ГТС Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 / А.В. Кирюхин, Т.В. Рычкова, Е.О. Дубинина // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 3–20.
2. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / А.В. Кирюхин. Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
3. Набоко С.И. Гейзеры Камчатки / С.И. Набоко // Труды Лаборатории вулканологии. М.: Изд-во АН СССР, 1954. Вып. 8. С. 126–209.
4. Рычкова Т.В. Гидрогеологический анализ условий формирования и функционирования гейзеров (на примере гидротермальных систем Камчатки): дисс. работа на соиск. уч. ст. к. г-м н. URL: <http://crust.ru/images/upload/newsfull184/2106.pdf> (дата обращения: 02.08.2021).
5. Сугрובה Н.Г. Некоторые закономерности режима гейзеров Камчатки / Н.Г. Сугрובה // Вулканология и сейсмология. 1982. № 5. С.35–48.
6. Устинова Т. И. Камчатские гейзеры / Т. И. Устинова М.: Географгиз, 1955. 77 с.
7. EiblEva P. S. Eruption Interval Monitoring at Strokkur Geysir, Iceland / P.S. EiblEva, Sebastian Hainzl, I.K. VeselyNele et al. // Geophysical Research Letters. V. 47, Issue 1. DOI: 10.1029/2019GL085266.
8. Hurwitz, S. The fascinating and complex dynamics of Geysir eruptions / S. Hurwitz, M. Manga // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2017. 45(1). 31– 59. DOI: 10.1146/annurev-earth-063016-015605
9. Hurwitz, S. Illuminating the voluminous subsurface structures of Old Faithful Geysir, Yellowstone National Park / S. Hurwitz, D.R. Shelly // Geophysical Research Letters. 2017. 44. 10,328– 10,331. DOI: 10.1002/2017GL075833.
10. Munoz-Saez Geysir eruption intervals and interactions: Examples from El Tatio, Atacama, Chile / C. Munoz-Saez, Namiki Atsuko, M. Manga // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 292. pp. 41–55. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.01.002
11. Rojstaczer Stuart Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California / S. Rojstaczer, S. Wolf // Geology. March 1992. V. 20. pp. 211–214.
12. Rojstaczer S. Variability in geysir eruptive timing and its causes: Yellowstone National Park / S. Rojstaczer, D. L. Galloway, S. E. Ingebritsen, D. M. Rubin // Geophysical Research Letters. 2003 / V. 30, № 18. P.1953 DOI: 2003GL017853.
13. Reed Mara H. The 2018 reawakening and eruption dynamics of Steamboat Geysir, the world’s tallest active geysir / Mara H. Reed, Carolina Munoz-Saez, Sahand Hajimirza et al. // Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. 2021. DOI: 10.1073/pnas.2020943118.
14. Wang, C.Y. Earthquakes and water / C.Y. Wang, M. Manga // Earthquakes and Water, Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag. 2010. V. 114. pp. 117–123. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8_7.

Научное издание

**Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation
«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology»
(Geothermal Volcanology Workshop 2021),
6–11 September, 2021**

**Материалы всероссийской научной конференции с международным участием
«Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа»
(Geothermal Volcanology Workshop 2021)
6–11 сентября 2021 г.**

Подписано к печати 27.10.2021

Формат 60x84/8

Бумага типографская

Усл.-печ. л. 19.75

Тираж 23 экз.

Заказ № 30306

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в ИВиС ДВО РАН,
в ООО «ФОН», 683024, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Владивостокская д. 37