



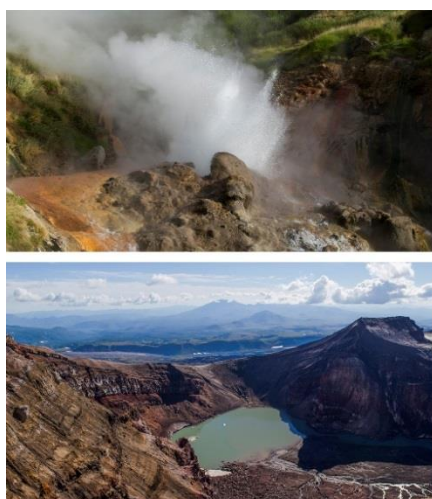
**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**Всероссийская научная конференция
с международным участием
«Геотермальная вулканология,
гидрогеология, геология нефти и газа»
(Geothermal Volcanology Workshop 2024)**

2 – 8 сентября 2024 г.

Материалы конференции



**ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ
2024**

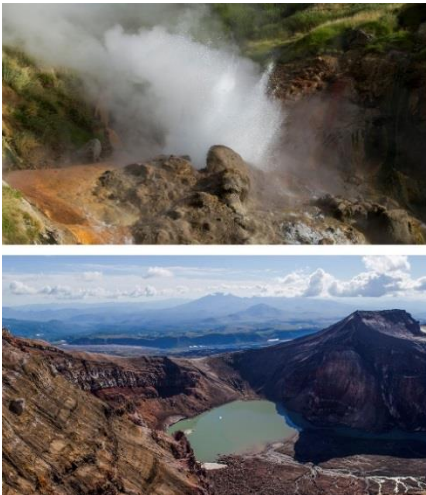


**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
INSTITUTE OF VOLCANOLOGY AND SEISMOLOGY
FAR EASTERN BRANCH
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

PROCEEDINGS

**of All-Russian Scientific Conference
with International Participation
«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology»
(Geothermal Volcanology Workshop 2024)**

**Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky
September 2 – 8, 2024**



**PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY
2024**

УДК 550.36+551.21+553.6+556.3

Научное издание

Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2024), 2 – 8 сентября 2024 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. – 111 с.

Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2024), September 2 – 8, 2024 – Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2024. – 111 p.

ISBN 978-5-902424-42-0

This Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil & Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2024) was held in Petropavlovsk-Kamchatsky in 2024 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 2024), проведенной Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в 2024 г. Освещаются результаты исследований по геотермофлюидомеханике 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, д.г.-м.н., доц. Г.Н. Копылова

Dr., Prof. A.V. Kiryukhin, Dr., Assoc. Prof. G.N. Kopylova

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

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

ISBN 978-5-902424-42-0

© ИВиС ДВО РАН, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, МАГМАТОГЕННЫЕ И ЭПИТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Кузнецова М.В.

«И снова дорога зовет за собой...» К 95-летию со дня рождения
Валерия Викторовича Аверьева 9

Кирюхин А.В.

Исследования магма-газо-водопроводящих систем вулканов..... 13

Поляков А.Ю., Кирюхин А.В.

Магматическая активность Мутновского вулкана в 2009-2024 г. 16

Плотинская О.Ю., Шиловских В.В., Грознова Е.О., Крючкова Л.Ю.

Дендритовидное золото Au-Ag-эпитермального месторождения Аметистовое (Камчатка) 20

РАЗДЕЛ II. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ И ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

Бо Фэн, Ченгао Чжун, Чжэнпэн Цуй, Сицин Хэ, Илун Юань

Экспериментальные измерения растворимости кварца с высоким разрешением в
сверхкритических геотермальных условиях 24

Нуждаев И.А.

Результат применения тепловизионной аэросъемки с БПЛА в зоне активного вулканизма
(Камчатка) 27

Резник Б.Е., Рахымбердина М.Е., Зимановская Н.А.

Методика локальных температурных измерений с помощью ИК-камер
на базе беспилотных летательных аппаратов 30

Половников В.Ю.

Численный анализ теплопритоков к геотермальному теплообменнику
с учетом испарения влаги в его конструкции 34

Хмарин Э.К., Баранов Т.С.

Текущий статус геологоразведочных работ на геотермальных лицензионных участках
Компании АО «Зарубежнефть» на полуострове Камчатка 38

Янковский С.А., Цибульский С.А., Крутенко Д.С., Янковская Н.С.

Потенциал термальных вод Томской области 41

РАЗДЕЛ III. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ

Лемзиков М.В.

Сопоставление механизмов очагов вулcano-тектонических землетрясений вулканов Шивелуч и Ключевской.....	43
--	----

Соломатин А.В.

О закономерностях изменения параметров сейсмического процесса, отражающих флюидогеохимические условия заключительной стадии подготовки очагов сильнейших Тихоокеанских землетрясений.....	47
---	----

РАЗДЕЛ IV. МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

Е.В. Черных, А.В. Кирюхин, О.О. Усачева, А.В. Сергеева

Моделирование и мониторинг геотермальных процессов в конусе Авачинского вулкана	51
---	----

Назарова М.А., Сергеева А.В., Кузьмина А.А., Карташева Е.В., Мартыненко Д.О.

Кинетика вымывания растворимых солей из пепла вулкана Шивелуч, апрельское извержение 2023 года.....	56
---	----

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

Фролова Ю.В., Большаков И.Е.

Инженерно-геологические аспекты исследования гидротермальных систем.....	60
--	----

Журавлев Н.Б.

Моделирование сезонных вариаций естественных разгрузок Верхне-Паратунского геотермального месторождения	65
---	----

РАЗДЕЛ VI. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ

Вахромеев А.Г., Данилова М.А., Погребная Д.А., Сергеева А.В., Мамаков Д.О., Корольков А.Т., Кирюхин А.В., Михеева Е.Д.

Геологическая модель формирования Ангаро-Ленского месторождения промышленных литиеносных рассолов – геодинамический, гидрогеохимический аспекты	69
---	----

Мартыненко Д.О., Сергеева А.В.

Нефтеуглеводороды в глинах Долины Гейзеров и Кальдеры Узон	74
--	----

Позолотина Л.А., Клочкова Т.А.

Альгоценозы термальных полей Мутновского месторождения	75
--	----

<i>Свалова В.Б.</i>	
Термогеодинамика литосферы и нефтегазоносность Кавказско-Каспийского и Карибско-Мексиканского регионов	78
<i>Писаренко Д.В., Еришова В.Б.</i>	
Особенности вторичных преобразований рифейских карбонатных отложений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления	83
<i>Гершман М.О., Еришова В.Б.</i>	
Изучение порового пространства в карбонатных коллекторах различными методами	87
<i>Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Позолотина Л.А., Назарова М.А., Кузьмина А.А., Карташова Е.В.</i>	
Вынос растворимых сульфатов с термальных полей Мутновского геотермального месторождения	89
<i>Плавник А.Г., Сальникова Ю.И.</i>	
Условия формирования пластовых вод сеноманских отложений Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения Западной Сибири	93
<i>Абдрашитова Р.Н.</i>	
К вопросу формирования маломинерализованных вод нефтегазоносных горизонтов Западно-Сибирского мегабассейна.....	97

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

Шитц Е.С.

Формирование Веб-ГИС в качестве инструмента накопления, визуализации и анализа данных о геотермальных объектах Узон-Гейзерной кальдеры (Кроноцкий заповедник)	100
---	-----

РАЗДЕЛ VIII. ДОКЛАДЫ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ ТОЛЬКО ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ

Спектор С.В., Красников Р.В., Новиков К.В., Платонова А.В., Попов Е.В.

Нижне-Менделеевский участок геотермального месторождения Горячий Пляж на о. Кунашир: результаты изучения и освоения	104
---	-----

Сергеева А.В., Вахромеев А.Г., Кирюхин А.В., Гладышкина А.В., Карташова Е.Г., Назарова М.А., Кузьмина А.А.

Взаимодействие магмы и соляных отложений как этап формирования предельно насыщенных редкометальных рассолов Сибирской платформы	108
---	-----

TABLE OF CONTENTS

CHAPTER I. MAGMO-HYDROTHERMAL SYSTEMS, MAGMATIC AND EPITHERMAL DEPOSITS

Kuznetsova Marina V.

«The road is calling again and again ...» In honor of the 95th anniversary of Valery Viktorovich Averyev..... 9

Kiryukhin Alexey V.

Studies of magma-gas-water conducting systems of volcanoes 13

Polyakov Andrey Yu., Kiryukhin Alexey V.

Magmatic activity of the Mutnovsky volcano in 2009–2024 16

Plotinskaya Olga Y., Shilovskikh Vladimir V., Groznova Elena O., Kruchkova Ludmila Y.

Electrum Dendrites from the Ametistovoe Epithermal Au-Ag Deposit (Kamchatka) 20

CHAPTER II. HYDROTHERMAL SYSTEMS, GEOTHERMAL AND HYDROMINERAL RESOURCES

Bo Feng, Chenghao Zhong, Zhengpeng Cui, Siqing He, Yilong Yuan

High-resolution experimental measurements of quartz solubility under supercritical geothermal conditions..... 24

Nuzhdaev Ivan A.

Results of UAV thermal imaging in an active volcanic zone (Kamchatka) 27

Resnik Boris E., Rakhymberdina Marzhan E., Zimanovskaya Natalya A.

Methodology of local temperature measurements with copter-based IR cameras 30

Polovnikov Viacheslav Yu.

Numerical analysis of heat gain to geothermal heat exchangers with moisture evaporation in the structure 34

Khmarin Eduard K., Baranov Timofei S.

Current status of geological exploration work at the geothermal license areas of the Zarubezhneft JSC Company on the Kamchatka Peninsula..... 38

Yankovsky Stanislav A., Tsibulskiy Svyatoslav A., Krutenko Daniil S., Yankovskaya Natalya S.

Potential of thermal waters of the Tomsk region 42

CHAPTER III. ACTIVE FAULTS AND SEISMICITY IN GEOFLUID SYSTEMS

Lemzikov Michail V.

Comparison of the Focal Mechanisms of the Volcano-Tectonic Earthquakes of the Volcanoes Shiveluch and Klyuchevskoy 43

Solomatina Alexey V.

On the Regularities of Changes in Seismic Process Parameters Reflecting Fluid and Geodynamic Conditions of the Final Stage of Preparation of the Sources of the Strongest Pacific Earthquakes 47

CHAPTER IV. MAGMATIC SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

Chernykh Evgenya V., Kiryukhin Alexey V., Usacheva Olga O., Sergeeva Anastasia V.

Modelling and Monitoring of Geothermal Processes in the Cone of the Avachinskiy Volcano..... 51

*Nazarova Maria A., Sergeeva Anastasia V., Kuzmina Anna A., Kartasheva Elena V.,
Martynenko Darina O.*

Kinetics of soluble salt leaching from the ash of Shiveluch volcano, April 2023 eruption 56

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

Frolova Julia V., Bolshakov Ilya E.

Engineering-geological aspects of the hydrothermal systems study 60

Zhuravlev Nikita B.

Modeling of seasonal variations of natural discharge of Upper-Paratunsky geothermal field 65

CHAPTER VI. CONDITIONS FOR THE FORMATION AND EXPLOITATION OF GEOTHERMAL AND HYDROCARBON DEPOSITS OF COMPLEX STRUCTURE

*Vakhromeev Andrey G., Danilova Maria A., Pogrebnaya Darya A., Sergeeva Anastasia V.,
Mamakov Denis O., Korolkov Alexey T., Kiryukhin Alexey V., Mikheeva Ekaterina D.*

Geological model of formation of the Angara-Lena deposit of industrial lithium brines –
geodynamic, hydrogeochemical aspects 69

Martynenko Darina O., Sergeeva Anastasia V.

Petroleum hydrocarbons in the clays of the Valley of Geysers and the Uzon Caldera..... 74

Pozolotina Liliia A., Klochkova Tatyana A.

Algocenoses of Thermal Fields of the Mutnovsky Geothermal region 76

Svalova Valentina B.

Thermogeodynamics of the lithosphere and oil and gas potential of the Caucasus-Caspian
and Caribbean-Mexican regions 78

Pisarenko Daria V., Ershova Victoria B.

Features of Secondary Transformations of Riphean Carbonate Deposits
of Yurubcheno-Tokhoma Oil and Gas Accumulation Zone..... 83

Gershman Milena O., Ershova Victoria B.

Study of pore space in carbonate reservoirs by different methods 87

*Sergeeva Anastasia V., Kiryukhin Alexey V., Pozolotina Liliya A., Nazarova Maria A.,
Kuzmina Anna A., Kartasheva Elena V.*

Removal of soluble sulfates from thermal fields of the Mutnovsky geothermal field 90

Plavnik Andrey G., Salnikova Yulia I.

Conditions for the Formation of Formation Waters of the Cenomanian Deposits of the Tazovskoye Oil and Gas Condensate Field in Western Siberia.....	93
--	----

Abdrashitova Rimma N.

On the Issue of the Formation of Low Mineralized Waters of Oil and Gas Bearing Horizons of the West Siberian Megabasin	97
--	----

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

Shitts Ekaterina S.

Formation of Web-GIS as a Tool of Accumulation, Visualization and Data Analyzing of Geothermal Objects of the Uzon-Geyzernaya Caldera (Kronotsky Reserve).....	100
--	-----

CHAPTER VIII. PAPERS SUBMITTED FOR PUBLICATION ONLY

Spector Sergey V., Krasnikov Ruslan V., Novikov Konstantin V., Platonova Alla V., Popov Evgeniy V.

Nizhne-Mendeleevsky Block of the Goryachy Plyazh Geothermal Field on Kunashir Island: Results of Study and Development.....	104
---	-----

Sergeeva Anastasia V., Vakhromeev Andrey G., Kiryukhin Alexey V., Gladyshekina Anna V., Kartasheva Elena G., Nazarova Maria A., Kuzmina Anna A.

Interaction of magma and salt deposits as a stage in the formation of extremely saturated rare-metal brines of the Siberian platform.....	108
---	-----

РАЗДЕЛ I. МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, МАГМАТОГЕННЫЕ И ЭПИТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

CHAPTER I. MAGMO-HYDROTHERMAL SYSTEMS, MAGMATIC AND EPITHERMAL DEPOSITS

УДК 550.36 (092)

«И снова дорога зовет за собой...» К 95-летию со дня рождения Валерия Викторовича Аверьева

М.В. Кузнецова

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

Работа посвящена основоположнику геотермальной вулканологии Валерию Викторовичу Аверьеву. Его «Соображения о создании геотермальной энергобазы на Камчатке» стали своего рода программой геотермических исследований на Камчатке и реализовывались в работах камчатских геологов и вулканологов.

Ключевые слова: В.В. Аверьев, история геотермических исследований Камчатки, Паужетская контрольно-наблюдательная станция, институт вулканологии

«The road is calling again and again ...» In honor of the 95th anniversary of Valery Viktorovich Averyev

Marina V. Kuznetsova

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

The work is dedicated to founder of geothermal Volcanology Valery Viktorovich Averyev. His «Point of view on development of geothermal energy base in Kamchatka» became a kind of geothermal research program in Kamchatka and was implemented in works of Kamchatka geologists and volcanologists

Keywords: V.V. Averyev, history of geothermal research in Kamchatka, Pauzhetskaya monitoring and observational station, Institute of Volcanology



Рисунок 1 – В.В. Аверьев

Валерий Викторович Аверьев родился 21 октября 1929 года в Москве. Отец, Виктор Николаевич, был историком (погиб на войне), мать, Мария Васильевна – учительницей. После окончания школы, в 1947 году Валерий Викторович поступил в МГГРИ (Московский государственный геологоразведочный институт), но, из-за тяжелого материального положения, был вынужден бросить учебу и пойти работать. С 1948 по 1953 он учился в МГУ на геологическом факультете по специальности «геология». На 4-м курсе Валерий Викторович прошел специализацию по гидрогеологии и после окончания МГУ был оставлен в аспирантуре при кафедре гидрогеологии (1953–1956). Одновременно с аспирантурой он работал в Институте курортологии и физиотерапии Минздрава СССР.

Его учителями и наставниками были Октавий Константинович Ланге, Борис Иванович Куделин и Валерий Владимирович Иванов. В аспирантуре Валерий Викторович

занимался изучением мышьяковистых вод Камчатки (Налычевское месторождение), Сахалина (Синегорское месторождение) и Кавказа (Джультинское месторождение). По результатам этих исследований в 1961 году была защищена диссертация «Углекислые мышьяковистые воды СССР» (научный руководитель О.К. Ланге).

Впервые на Камчатку Валерий Викторович приехал в 1954 году в составе специальной Камчатской геотермической экспедиции Лаборатории вулканологии. Геотермическая экспедиция была организована по распоряжению Президиума АН СССР от 15 марта 1954 г. в целях «обоснования конкретных предложений по практическому использованию гидротермальный ресурсов Южной Камчатки и выборе объектов для дальнейшей детальной разведки и использованию» (Архив.. Отч. 173). Экспедицией были обследованы горячие источники в районе, прилегающем к городу Петропавловску-Камчатскому: Паратунские (Нижние, Средние и Верхние), Жировские, Налачевские, Таловские и Дзензурские и Паужетские ключи. По результатам геотермических экспедиций Лаборатории вулканологии 1954–1955 гг. для проведения буровых работ был выбран район Паужетских источников (Архив.. Отч. 176). Здесь, для выполнения комплекса геолого-гидрогеологических исследований при бурении, в 1957 году была создана Паужетская контрольно-наблюдательная станция (Рычагов, 2017).

После успешного окончания аспирантуры Валерий Викторович Аверьев был приглашен на работу в Лабораторию вулканологии для работы начальником гидрогеологического отряда на Паужетской контрольно-наблюдательную станцию (1957–1960). Под его руководством и личном участии в 1958–1959 гг. была пробурена и опробована **первая** в нашей стране пароводяная скважина. В ходе подготовки и бурения первой роторной скважины В.В. Аверьевым и сотрудниками Паужетской контрольно-наблюдательной станции были проведены важные наземные гидрогеотермические исследования: сделана прогнозная оценка температур в недрах месторождения, проведена термометрическая съемка в масштабе 1:1000 на площади ~0,8 км² с измерением температуры на глубине 1 м; ооконтурены поверхностные тепловые аномалии на участке Паужетских источников, определена видимая и полная разгрузка термальных вод и вынос тепла в естественных условиях (Сугробов, 2012).

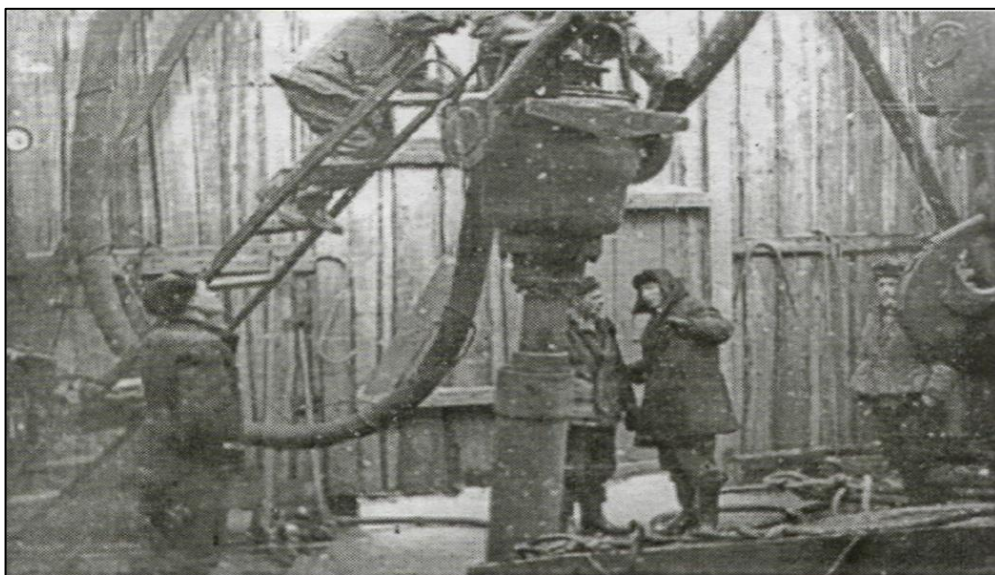


Рисунок 2 – Бурение скважины Р-1 на Паужетке. В центре, у забоя В.В. Аверьев разговаривает с буровым мастером В. Крещановским

О непростых буднях коллектива Паужетки того времени можно причитать статье «Ученый спускается в кратер» газеты «Известия» за 5 июня 1963 г.: «Рассказывали про точные расчеты и мужество Аверьева во время неудачи с первой скважиной. Вот её построили, пробурили, а подземная вода приняла режим гейзера: выкинет струю и смолкнет на несколько часов, до следующего взрыва. Скважина не давала и пяти процентов нужного пара. Под сомнение из-за этого стал весь план электростанции. В панике появились

противники начавшейся стройки. Аверьев разобрал механику неудач. Он взял на себя тогда огромный риск и ответственность». Для успешного проведения исследований непосредственно на Паужетке была изготовлена недостающая аппаратура для опробования скважин (система оголовков, лубрикаторов, сепарационных установок и т.д.). Валерий Викторович **разработал** методику опробования пароводяных скважин для получения гидрогеологических и теплофизических параметров скважин. Теоретическое обоснование этой методики дано в работе «**Особенности динамики пароводяных скважин**» (Аверьев В.В. Особенности динамики пароводяных скважин // Труды лаборатории вулканологии М., 1960. Выпуск 18. С. 113–122). В наиболее полном виде методика опубликована в книге «**Паужетские горячие воды на Камчатке**» (Паужетские горячие воды на Камчатке / В.В. Аверьев, В.И. Белоусов, В.М. Сугробов и др.; М.: Наука, 1965. 207 с). Впоследствии она применялась и на других месторождениях Камчатки и Курильских островов.

В статье «**Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки**» (Аверьев В.В. Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки М., 1961. Вып. 19 С. 80–98) он показал, что формирование и движение гидротерм происходит в условиях водонапорного режима, господствующего в верхней части земной коры, и зависит от конкретной гидрогеологической обстановки на участке их появления.

В 1961 году Валерий Викторович Аверьев защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук и в 1961–1962 гг. работал ученым секретарем в Лаборатории вулканологии. После организации Института вулканологии СО АН СССР (1962) в Петропавловске-Камчатском он, по приглашению Б.И. Пийпа, возглавил лабораторию гидрогеологии и геотермии, в дальнейшем отдел геотермии, а в 1966 г. стал заместителем директора по научной работе.

В 1962–1966 гг. по инициативе В.В. Аверьева проводились экспедиционные обследования наиболее крупных высокотемпературных гидротермальных систем Камчатки. Акцент в этих исследованиях был сделан на количественную оценку выноса тепла (тепловую мощность). Он **разработал** простейший метод измерения теплоотдачи с поверхности нагретого и парящего грунта. Этот метод применялся при исследовании Долины Гейзеров (1962), Северо-Мутновской и Большебанной термоаномалий (1962–1964), термальных полей Камбального хребта (1964–1965), Кошелевского вулканического массива (1966–1967), района Большого Семячика (1966), Узона (1966–1967) (Рычагов, 2017). Для него исследования Паужетского геотермального месторождения и позднее Узон-Гейзерного геотермального района послужили базой, давшей фактический материал, на котором он отрабатывал общий подход к проблемам геотермии (Белоусов, Эрлих, 2015). В работах этих лет он уделил большое внимание проблеме связи современного гидротермального процесса и магматической деятельности (Аверьев В.В. **О соотношении между гидротермальной и магматической деятельностью** // Проблемы вулканизма. Петропавловск-Камчатский, 1964. С. 251–253). Анализируя температуру в недрах систем, тепловую мощность, интенсивность теплового питания и продолжительность гидротермальных систем, Валерий Викторович сделал вывод, что тепловое питание современных гидротермальных систем осуществляется за счет эндогенного пара (горячего минерализованного газонасыщенного флюида. (Аверьев В.В. **Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью** // Современный вулканизм. М., 1966. С. 118–128).

Продолжая работы по изучению гидротермальных систем Камчатки, он **выделил** в восточной вулканической зоне три крупных геотермальных района (Паужетский, Мутновский, Семячинский) и подошел к оценке их ресурсов. Он **первый** высказал мнение, что геотермальные ресурсы Камчатки могут стать реальной базой для строительства крупных геотермальных электростанций. Статья «Вулканы и люди» (Вечерний Ленинград, 1963) информирует: «Они, наконец, нашли пути использования подземных горячих источников, которыми так богата Камчатка, для электрификации и теплофикации города Петропавловска и прилегающих к нему районов. Над этой проблемой работает молодой кандидат наук Валерий Аверьев, работает столь серьезно и энергично, что даже скупая на похвалы Набоко сказала о нём: «Энтузиаст!».

На основании полученных оценок Валерий Викторович составил и передал руководству Камчатской области и различные ведомства специальную записку «**Соображения о создании геотермальной энергобазы на Камчатке**», в которой **рекомендовал** использовать геотермальные ресурсы в качестве основного источника энергоснабжения Камчатки (Сугробов, 2020).

В 1967 году за большие заслуги в развитии советской геотермии он был награжден орденом «Знак Почета».

После обнаружения под Авачинским вулканом геофизической аномалии В. В. Аверьев обратил внимание на возможность использования тепловых ресурсов магматических масс в геотермальной энергетике (Аверьев В.В. **Перспективы использования подземного тепла вулканических областей** / В.В. Аверьев, Е.А. Вакин, Б.Г. Поляк // Геотермические исследования и использование тепла Земли. М., 1966. С. 273–279). Предложение «**О глубоком бурении на современных гидротермальных системах и в зоне влияния магматических тел**» он обсуждал в 1967–1968 гг. в организациях Академии наук и Министерства геологии.

Валерий Викторович Аверьев **основал и возглавил** новое направление в отечественной геотермической науке – геотермию областей активного вулканизма (**геотермальную вулканологию**), **создал** теорию теплового питания гидротермальных систем, **высказал** новые представления о природе кислого вулканизма, **разработал** методы оценки энергетических ресурсов месторождений подземного тепла (Карпов, 2016). Он **один из организаторов** строительства первой в СССР Паужетской ГеоЭС, установленная мощность которой составляет сейчас 12 МВт, и **инициатор** разработки схемы теплоснабжения города Петропавловска-Камчатского Паратунскими термальными водами (Кирюхин, Сугробов, 2019).

В его честь назван один из самых активных гейзеров в Долине Гейзеров – «**Аверьевский**», а также минерал «**аверьевит**», открытый на вулкане Толбачик в продуктах fumarольной деятельности Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг.

Список литературы

1. Белоусов В.И. Становление геотермальной энергетики Камчатки: проблемы и решения / В.И. Белоусов, Э.Н. Эрлих // Вопросы истории естествознания и техники. 2015. Т. 36. № 2. С. 306–321.
2. Карпов Г.А. Валерий Викторович Аверьев – выдающийся исследователь геотермальной энергии Камчатки / Г.А. Карпов, В.М. Сугробов // Крашенинниковские чтения. XXXIII. «В путь за непознанным...». Петропавловск-Камчатский, 2016. С. 137–139.
3. Кирюхин А.В. Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения / А.В. Кирюхин, В.М. Сугробов // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65.
4. Рычагов С.Н. Начало освоения геотермальной энергии на Камчатке и перспективы её использования / С.Н. Рычагов // История науки и техники. 2017. № 7. С. 45–51.
5. Сугробов В.М. О работах В.В. Аверьева и С.А. Федотова по изучению гидротермальных систем и магматических очагов для развития геотермальной энергетики Камчатки (воспоминание) / В.М. Сугробов // 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, 2020. С. 20–26.
6. Сугробов В.М. Паужетка. Первые шаги в освоении тепловой энергии Земли / В.М. Сугробов // Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 1962–2012. Петропавловск-Камчатский, 2012. С. 191–198.
7. Архив ИВиС ДВО РАН. Ф. 1. Оп. 2. Отч. 173.
8. Архив ИВиС ДВО РАН. Ф. 1. Оп. 2. Отч. 176.

Исследования магма-газо-водопродводящих систем вулканов

А.В. Кирюхин

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

Магма-газо-водопродводящие системы вулканов обеспечивают транспорт и аккумуляцию геофлюидных фаз (магма, жидкая вода, газ) в земной коре. В зависимости от режима и условий теплового и водного питания подземные геофлюидные резервуары могут: извергать продукты на поверхность Земли, и (или) формировать геотермальные, гидроминеральные и рудные месторождения. В связи с этим, в данной работе рассматривается: (1) Механическая взаимосвязь извержений вулканов Ключевской и Безымянный; (2) Гидротермальная система под лавовой пробкой Авачинского вулкана; (3) Магматическая активность Мутновского вулкана; (4) Формирование азотных терм в Паратунском грабене; (5) Формирование гидротермальных систем в структуре Корякского вулкана; (6) Циклический режим разгрузки в Долине Гейзеров; (7) Формирование рапассиллов на юге Сибирской платформы.

Ключевые слова: вулкан, магма, газ, вода, транспорт, аккумуляция, месторождение, извержение

Studies of magma-gas-water conducting systems of volcanoes

Alexey V. Kiryukhin

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

Magma-gas-conducting systems of volcanoes provide transportation and accumulation of geofluid phases (magma, liquid water, gas) in the Earth's crust. Depending on the regime and conditions of thermal and water recharge, underground geofluid reservoirs can: erupt products on the Earth's surface, and (or) form geothermal, hydro-mineral and ore deposits. In this regard, this paper examines: (1) The mechanical relationship between the eruptions of Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes; (2) The hydrothermal system beneath the lava plug of Avacha volcano; (3) The magmatic activity of Mutnovsky volcano; (4) Formation of N₂-therms in the Paratunsky graben; (5) Formation of hydrothermal systems in the structure of the Koryaksky volcano; (6) Cyclic mode of discharge in the Valley of Geysers; (7) Formation of rapa-sills in the south of the Siberian Platform.

Keywords: volcano, magma, gas, water, transport, accumulation, deposit, eruption

Механическая взаимосвязь извержений вулканов Ключевской и Безымянный

(Кирюхин и др., 2023а; 2024)

С применением Frac-Digger метода выявлена магматическая активность под Ключевским и Безымянным вулканами в период с 2000 по 2020 гг. в виде даек и силлов. 3D анализ последовательностей даек и силлов, предшествующих 17 извержениям вулкана Безымянный, показывает, что большинство извержений (10 из 17) инициированы дайками, инжектированными из глубинной магматической камеры Ключевского вулкана (K2, расположенной на интервале глубин от –31 до –27 км) в малоглубинную магматическую камеру Безымянного вулкана (B1, в интервале глубин от –3 до +2 км). В некоторых случаях извержениям вулкана Безымянный предшествовали дайки (4 из 17) или силлы (3 из 17), инжектированные из малоглубинной магматической камеры Ключевского вулкана (K1, расположенной на глубине от –1 до +2 км). Двумерные численные модели распределения напряжений в условиях наклонного залегания слоев (Gudmundsson, 2011) подтверждают такую возможность питания вулкана Безымянный за счет крутопадающих даек из глубинного магматического резервуара Ключевского вулкана K2, а также механизма дебондинга Кука-Гордона (Gudmundsson, 2006), открывающего слабый контакт на небольшой глубине для формирования силлов между малоглубинными магматическими резервуарами Ключевского и Безымянного вулканов.

Гидротермальная система под лавовой пробкой Авачинского вулкана

(Черных и др., 2024)

Разработана термогидродинамическая TOUGH2-модель гидротермальной системы в конусе Авачинского вулкана. На модели учитывается тепловое питание в основании конуса за счет инъекции силлов и водное питание за счет инфильтрации. В качестве неконденсирующихся газов рассматриваются CO_2 и N_2 . Для калибровки модели использовались значения тепловой разгрузки (фумаролы) и притока/аккумуляции магмы в конус Авачинского вулкана (определенного по сейсмоданным). Результаты моделирования показывают возможность гидротермального взрыва с разрушением лавовой пробки, увеличение доли неконденсирующихся газов может значительно ускорить процесс.

Магматическая активность Мутновского вулкана *(Поляков и др., 2024)*

Магматическая активность вулкана Мутновский оценивается Frac-Digger методом по сейсмическим данным, она сопровождается притоком магматического газа в эксплуатируемый геотермальный резервуар (фиксируемого по изменениям парциального давления НКГ на конденсаторе МГеоЭС). Это доказывается синхронизацией магматических инъекций (со сдвигом по времени на 1–2 мес.) с аномалиями парциального давления НКГ. По результатам наблюдений 2019–2022 гг. выявлено, что обвалу в северной части кратера вулкана Мутновский 19.08.2021 предшествовала магматическая активность начиная с 04.2020 г (дайки #99–106) и в мае-июне 2021 г (дайки #118–121); фреатический взрыв у скв. 022 синхронизирован с инъекцией дайки #134 в феврале-марте 2023 г.; обвал 06.09.2023 г синхронизирован с инъекцией роя даек #172+.

Формирование азотных терм в Паратунском грабене *(Журавлев, 2023; Кирюхин и др., 2024)*

В качестве природного объекта для тестирования моделей используется Верхне-Паратунское геотермальное месторождение. Азотные гидротермальные системы характеризуются отсутствием магматического флюидного питания, поэтому их формирование рассматривается на термогидродинамических моделях сквозной проточной циркуляции от области атмосферного водного питания через систему резервуаров-аккумуляторов термальных вод в условиях кондуктивного съема тепла из вмещающих горных пород до зоны разгрузки (жерло потухшего вулкана Горячая Сопка). Показана достаточность R–Z радиально-цилиндрической структуры каналов гидротермальной системы для обеспечения наблюдаемых параметров ее тепловой и массовой разгрузки.

Формирование гидротермальных систем в структуре Корякского вулкана

Нерешенной задачей является асимметричность гидротермальных разгрузок к югу и северу от Корякского вулкана.

Циклический режим разгрузки в Долине Гейзеров *(Kiryukhin et. al, 2023b)*

Гидротермальная система в Долине Гейзеров является дериватом магматической активности вулкана Кихпинич. Геологические катастрофы в Долине гейзеров (оползень 2007 г. и сель 2014 г.) существенно нарушили покрывку продуктивного гейзерного резервуара. Это изменило режим гейзеров и вызвало сезонную цикличность глубинной разгрузки гидротермальной системы. Термогидродинамическое моделирование воспроизводит наблюдаемое сезонное уменьшение глубинной разгрузки и объясняет это конденсацией газовой фазы в результате инфильтрации холодных поверхностных вод. Последующая термогидродинамическая-химическая модель, объясняет снижение содержания CO_2 в гейзерах, ограничивающее мощность их извержений.

Формирование рапа-силлов на юге Сибирской платформы *(Вахромеев и др., 2024)*

Показано, что формирование субпластовых залежей предельно насыщенных рассолов обогащенных литием и др. ЩЗМ в карбонатных и терригенно-карбонатных комплексах нижнего палеозоя юга Сибирской платформы может являться результатом пост-магматического транспорта «исходных» рассолов. Сформированные на гигантской территории осадочного чехла вторичные монолитные флюидоупоры (Усольский силл), привели к росту пластовых давлений под силлом, к локализации рассолопотока в жерлах потухших вулканов, и формированию субгоризонтальных трещинных систем природного

гидроразрыва. В последующих мезо-кайнозойских этапах ТМА, процессы перетока и концентрирования рассолов приводили к аккумуляции в них рапы (рапа-силлы). Агентом гидроразрыва могла являться также углеводородная фаза (метан или нефть), при условии их парагенетической связи с исходными залежами редкометалльных рассолов.

Работа выполнена с использованием данных, 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/>).

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127/>».

Список литературы

1. *Вахромеев А.Г.* Моделирование условий формирования рапа-силлов и эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы / *А.Г. Вахромеев, А.В. Кирюхин, А.В. Сергеева, И.В. Литвинова* // XXIV Всероссийское совещание по подземным водам Востока России. Екатеринбург. 2024 г.
2. *Журавлев Н.Б.* Концептуальная модель теплового питания низкотемпературного геотермального месторождения без дополнительных тепловых источников / *Н.Б. Журавлев* // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа». П-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 37–40.
3. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А.В. Кирюхин* // СПб.: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
4. *Кирюхин А.В.* Магматическая система Ключевского вулкана по сейсмическим данным и их геомеханической интерпретации / *А.В. Кирюхин, О.В. Бергаль-Кувикас, М.В. Лемзиков, Н.Б. Журавлев* // Записки Горного института. 2023. № 263. С. 698–714.
5. *Кирюхин А.В.* Моделирование условий формирования азотных гидротермальных систем / *А.В. Кирюхин, Н.Б. Журавлев* // Всероссийское совещание по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам Востока России) Екатеринбург 21–28 июня 2024 г.
6. *Поляков А.Ю.* Мониторинг притока неконденсирующихся газов в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар в 2019–2023 гг. / *А.Ю. Поляков, А.В. Кирюхин* // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной конференции посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2024 г. П-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2024 г. С. 241–244.
7. *Черных Е.В.* Моделирование термогидродинамических процессов в конусе Авачинского вулкана / *Е.В. Черных, А.В. Кирюхин, О.О. Усачева* // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной конференции посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2024 г. П-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2024 г. С. 241–244.
8. *Gudmundsson A.* Deflection of dykes into sills at discontinuities and magma-chamber formation // *Tectonophysics*. 2011. № 500. P. 50–64.
9. *Gudmundsson A.* How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes // *Earth-Sci. Reviews*. 2006. № 79. P. 1–31.
10. *Kiryukhin A.V.* Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano triggering eruptions of Bezymianny volcano based on seismological and petrological data / *A.V. Kiryukhin, O.V. Bergal-Kuvikas, M.V. Lemzikov* // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2023. V. 442. Art. 107892.
11. *Kiryukhin A.V.* Modeling of the thermal-hydrodynamic and chemical regime of Geysir reservoir (Valley of Geysir, Kamchatka) / *A.V. Kiryukhin, A.V. Sergeeva, O.O. Usacheva* // *Geothermics*. 2023. Vol. 115. P. 102808.

Магматическая активность Мутновского вулкана в 2009–2024 г.

А.Ю. Поляков, А.В. Кирюхин

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

С января 2009 по август 2024 г. в Мутновском геотермальном районе зарегистрировано 5813 землетрясений, 92% из них входят в 201 плоско-ориентированный кластер, интерпретируемые как магматические инъекции даек и силлов, внедряющихся преимущественно в северо-восточном секторе вулкана Мутновский. Измерение парциального давления неконденсированного газа на конденсаторе Мутновской ГеоЭС позволяет отслеживать притоки магматического газа, синхронизированного с инъекциями магмы в районе Мутновского вулкана.

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

Magmatic activity of the Mutnovsky volcano in 2009–2024

Andrey Yu. Polyakov, Alexey V. Kiryukhin

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

From January 2009 to August 2024 there are 5813 earthquakes have been registered in the Mutnovsky geothermal field, 92% of them are 201 plane-oriented clusters interpreted as magmatic injections of dikes and sills injected mainly in the northeastern sector of Mutnovsky volcano. Measurement of the partial pressure of non-condensed gas at the condenser of the Mutnovsky GeoPP traces the inflows of magmatic gas synchronized with magma injections in the area of Mutnovsky volcano.

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

Введение

Пять сейсмических станций регистрируют сейсмичность в Мутновско-Гореловской вулканической зоне (MTV, GRL, ASA, RUS, PET). Выделение плоско-ориентированных кластеров, интерпретируемых как магматические инъекции даек и силлов, выполнялось по каталогам микроземлетрясений (MEQ) КФ ФИЦ ЕГС РАН с использованием программы Frac-Digger (Кирюхин и др., 2020; Поляков, 2020; Kiryukhin et al., 2018; 2020) (критерий выборки: временной интервал $\delta_t = 30$ дней, близость в горизонтальной плоскости $\delta_R = 6$ км, близость к плоской ориентации (расстояние от события до плоскости $\delta_Z = 1$ км).

Генерация электрической энергии на Мутновской ГеоЭС осуществляется посредством двух турбин по 25 МВт каждая, питание турбин осуществляют геотермальные скважины 24, А2, Гео-3, 029W, 016, ГК1, 042, 013, 017, 037, Гео-2 (рис. 1) через два сепаратора.

Давление в Мутновском двухфазном геотермальном резервуаре показало чувствительность к сильным землетрясениям (Кирюхин и др., 2006). Измерение парциального давления НКГ (P_{NCG}) на конденсаторе Мутновской ГеоЭС позволяет отслеживать притоки магматического газа, синхронизированного с инъекциями магмы в районе Мутновского вулкана (Кирюхин, 2020; Поляков, 2020; Kiryukhin et al., 2018; 2020). С этой целью в 2019 г. было создано и апробировано оригинальное устройство, позволяющее обеспечить дистанционные наблюдения за изменением P_{NCG} в геотермальном паре в режиме реального времени (Поляков, 2020). С 2020 г. филиалом «Возобновляемая энергия» ПАО Камчатскэнерго предоставляются исходные данные по технологическим измерениям на конденсаторе Мутновской ГеоЭС, обработка которых осуществляется по методике, описанной в патенте № 2801789 С1 (Кирюхин и др., 2023).

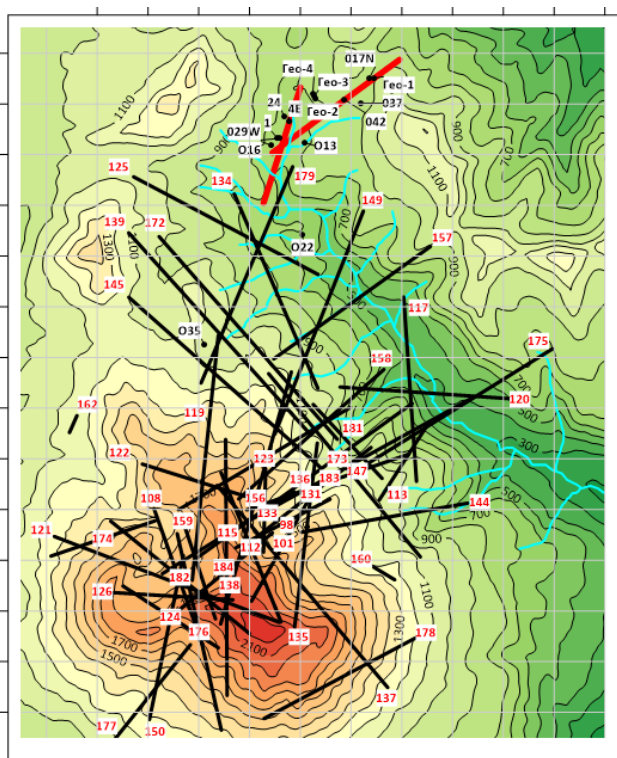


Рисунок 1 – Обобщающее поле инъекций даек на отметке -3000 м за период 2019–2024 гг. и позиции эксплуатационных скважин, доставляющих магматический газ на конденсатор МГеоЭС. Красными линиями показаны следы продуктивных разломов «Основной» и «Северо-Восточный» на отметке -250 м

Результаты мониторинга 2009–2024 гг.

С января 2009 по август 2024 г. в Мутновском геотермальном районе зарегистрировано 5813 землетрясений, 92% из них составляют 201 плоско-ориентированный кластер, интерпретируемый как магматические инъекции даек и силлов, внедряющихся преимущественно в северо-восточном секторе вулкана Мутновский на площади 2×10 км, на глубине от -4.0 до -2.0 км.

Данные по вариациям P_{NCG} в конденсаторе турбины МГеоЭС (2019–2024 гг.), получаемые по методике (Кирюхин и др., 2023) для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения основных пиков, были обработаны методом скользящего среднего. В результате выявлено 37 аномалии P_{NCG} (табл.). На рис. 2 в качестве примера приведены основные пики аномалий P_{NCG} (Pa) в конденсаторе турбины Мутновской ГеоЭС, моменты начала инъекций даек по эпизоду 01–08.2024 г. На рис. 3 показаны в 3D изображении рои даек, продуктивные разломы Основной и Северо-Восточный и эксплуатационные скважины МГеоЭС по эпизоду 09–12.2023 г.

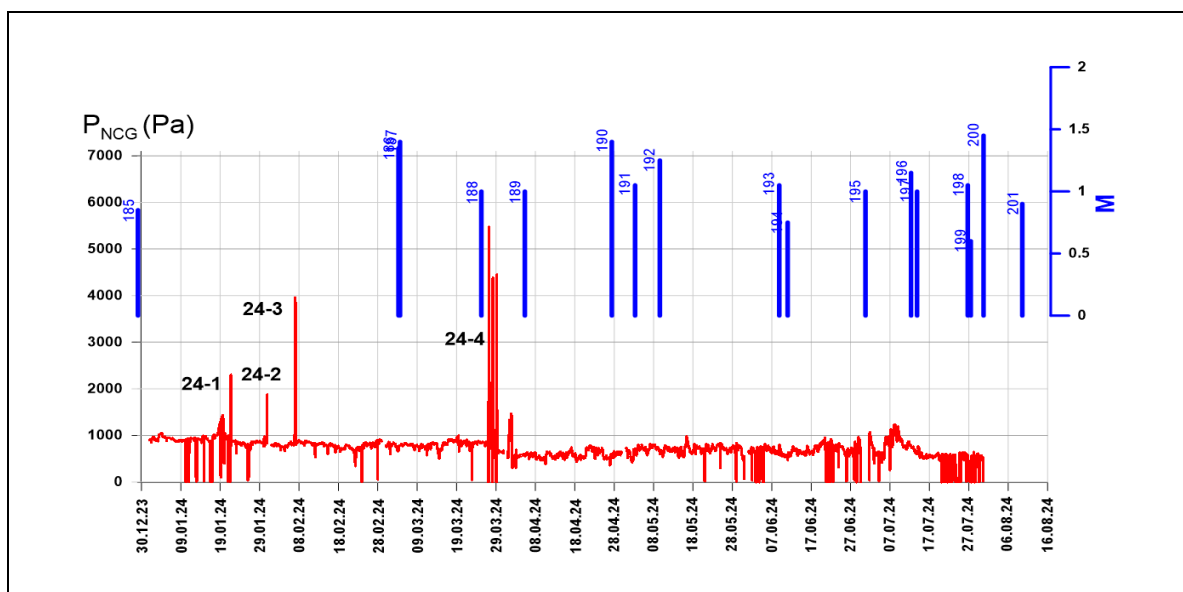


Рисунок 2 – Вариации P_{NCG} (Pa) в конденсаторе турбины Мутновской ГеоЭС (01.01 – 31.07.2024 гг.) и рои даек, выявленных по сейсмоданным (M – максимальная магнитуда при инъекции даек)

Таблица. Рои даек под Мутновским вулканом, сопровождающиеся аномалиями P_{NCG} и выделением сейсмической энергии ΔE (109 Дж). Δt (сут.) – сдвиг по времени между аномалией НКГ и началом инъекции роя даек

Дата	Рой даек	№ аномалии НКГ	Δt (сут.)	ΔE(10 ⁹ Дж)	Примечание
08.2019	98	19-1	20	0.1	
04.2020	100-101	20-1	15-20	0.2	
07.2020	108-109	20-2	3-20	0.03	
09.2020	112-115	20-3, 20-4, 20-5	5-22	0.15	
01-08.2021	117-122	Нет данных по P _{NCG}		0.15	Обвал ≈1 млн. м ³ в кратере Мутновского вулкана 18.08.2021
09-11.2021	Даек не выявлено	21-1, 21-2, 21-3, 21-4		0.2	
12.2021	123	21-5	25	0.07	
01.2022	124-125	22-1	12-14	0.03	
02.2022	126	22-2	3	0.1	
03-05.2022	Нет сейсмоданных	22-3, 22-4, 22-5, 22-6			
07.2022	128	22-7, 22-8	3	0.06	
08-12.2022	129-130	22-9, 22-10	23-25	0.07	
10-11.2022	131-132	22-12, 22-13, 22-14, 22-15	30-59	0.03	
03.2023	133-139	23-1	5-45	0.02	Фреатический взрыв у скв. 022
04.2023	144-146	23-2	3-10	0.01	
05.2023	147-150	23-3	5-27	0.02	
07.2023	156-160	23-4	3-18	0.02	
07.2023	162	23-5	8	0.02	
09.2023	172-174	23-6	2-6	0.01	Обвал в кратере Мутновского вулкана 15.09.2023
10.2023	175-181	23-7	9-11	0.02	
11.2023	182-184	23-8	17-20	0.02	
01.2024	185	24-1 – 24-3	10-20	0.02	
03.2024	186-188	24-4	17-20	0.02	

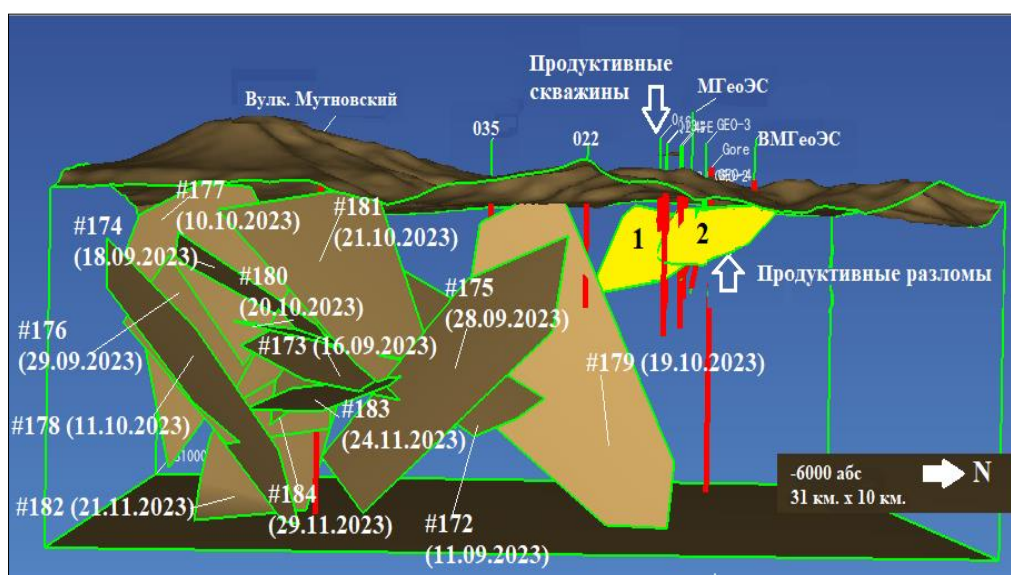


Рисунок 3 – Геометрия инъекций магмы в районе Мутновского вулкана по сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН за 09-12.2023 г, предшествующих аномалиям P_{NCG}, цифрами указаны номера даек (Табл. 1, Рис. 3). На рисунке показаны также эксплуатационные (016, 013, 029W, 1, 26, 4-E, Geo-1, Geo-2, Geo-3, Geo-4) и фонтанирующие скважины (022, 035) и продуктивные разломы «Основной» и «Северо-Восточный» (1, 2)

На рис. 1 показано обобщающее поле инъекций даек на отметке –3000 м за период 2019–2023 гг. и позиции эксплуатационных скважин, доставляющих магматический газ на конденсатор МГеоЭС.

Выводы

Магматическая активность вулкана Мутновский, выявляемая по сейсмическим данным в виде инъекций даек и силлов в северо-восточном секторе вулкана в период с 2009 по 2024 г., сопровождается притоками магматического газа в эксплуатируемый геотермальный резервуар, фиксируемыми по изменениям парциального давления НКГ на конденсаторе Мутновской ГеоЭС). Это подтверждается синхронизацией магматических инъекций (со сдвигом по времени на 1-2 мес.) с аномалиями парциального давления НКГ.

Авторы выражают признательность директору филиала ПАО Камчатскэнерго «Возобновляемая энергетика» А.А. Любину, начальнику Мутновских ГеоЭС М.Л. Безотечество и ведущему инженеру О.В. Колесникову за предоставление данных по давлению и температуре в конденсаторе Мутновской ГеоЭС.

Работа выполнена с использованием данных, 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/>).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопродводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127 (<https://rscf.ru/project/23-27-00127/>).

Список литературы

1. *Кiryukhin A.V.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *A.V. Kiryukhin* // СПб.: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
2. *Кiryukhin A.V., Поляков А.Ю., Журавлев Н.Б.* Устройство для оценки парциального давления неконденсированного газа в геотермальном паре. / *A.V. Kiryukhin, A.Yu. Polyakov, N.B. Zhuravlev*, Патент № 2801789 С1 Российская Федерация. 15 августа 2023 г.
3. *Поляков А.Ю.* Удаленный мониторинг динамики поступления магматического газа в геотермальный резервуар на базе станции НОВО RX 3000 // 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.
4. *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. V. 356. P. 36–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.010>.
5. *Kiryukhin A.* Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations / *A. Kiryukhin, E. Chernykh, A. Polyakov et al.* // Geosciences. 2020. 10, 52. P. 1–16, DOI: 10.3390/geosciences10020052.
6. *Kiryukhin A.V.* Magma Fracking and Production Reservoirs Beneath and Adjacent to Mutnovsky Volcano Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, P.O. Voronin, N.B. Zhuravlev, O.O. Usacheva, A.V. Solomatin, P.A. Kiryukhin* // Geothermics 105. 2022. P. 102474.
7. *Кiryukhin A.V.* О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре / *A.V. Kiryukhin, B.A. Корнеев, А.Ю. Поляков* // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 3–11.

Дендритовидное золото Au-Ag-эпитермального месторождения Аметистовое (Камчатка)

О.Ю. Плотинская¹, В.В. Шиловских², Е.О. Грознова³, Л.Ю. Крючкова²

¹ИГЕМ РАН, Москва, Россия.

²СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт экспериментальной минералогии РАН, Черногловка, Россия

Дендритовидное самородное золото и ассоциирующие с ним сфалерит и кварц из руд Au-Ag-эпитермального месторождения Аметистовое (Камчатка) исследованы при помощи комплекса методов: рентгеноспектрального микроанализа, термобарогеохимии, дифракции обратно-рассеянных электронов и рентгеновской томографии. Предложена модель их формирования и последующей перекристаллизации.

Ключевые слова: самородное золото, дендриты, сфалерит, эпитермальное, Камчатка

Electrum Dendrites from the Ametistovoe Epithermal Au-Ag Deposit (Kamchatka)

Olga Y. Plotinskaya¹, Vladimir V. Shilovskikh², Elena O. Groznova³, Ludmila Y. Kruchkova²

¹IGEM RAS, Moscow, Russia

plotin@igem.ru

²Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

³Institute of experimental mineralogy RAS, Chernogolovka, Russia

Dendrite-like electrum in association with quartz and sphalerite from ores of the Ametistovoe epithermal Au-Ag deposit (Kamchatka) were investigated by microprobe, fluid inclusion study, electron backscattered diffraction, and X-ray tomography. A model of their formation and farther recrystallization was proposed.

Keywords: electrum, dendrites, sphalerite, epithermal, Kamchatka

Введение

Месторождения эпитермального семейства нередко характеризуются ураганными содержаниями полезного компонента, прежде всего, золота и серебра. В таких участках нередки колломорфные и крустификационные текстуры руд, обусловленные последовательным отложением халцедоновидного кварца, а также дендритовидные выделения рудных минералов. Особенно часто это наблюдается на объектах низкосульфидизированного типа с низким содержанием сульфидов в рудах (*Sillitoe, Hedenquist, 2003* и цитируемая литература). В данной работе охарактеризовано дендритовидное самородное золото из руд месторождения Аметистовое.

Геологическое строение месторождения

Эпитермальное Au-Ag месторождение Аметистовое расположено на севере полуострова Камчатка и принадлежит к Тклаваямскому рудному полю Ичигин-Уннейваямского вулканогенного района, который входит в состав Корякско-Центрально-Камчатского вулканического пояса. Оруденение приурочено к палеогеновым породам ичигинского комплекса (лавы, реже туфы дацитов, андезито-дацитов и субвулканические тела диоритовых порфириров, андезитов, дацитовых порфириров). По классификации (*Sillitoe, Hedenquist, 2003*) месторождение может быть отнесено к промежуточно-сульфидизированному типу (intermediate sulfidation). Запасы месторождения (C1 + C2) на 1995 г. составили 52.5 т Au со средним содержанием 13.62 г/т (*Nedradv.ru*). Выделено 4 стадии минералообразования (*Грановский, 1993*): I – пирит-кварцевая, II – сульфидно-

кварцевая, III – золото-каолинит-хлорит-сульфидно-кварцевая, IV – карбонат-кварцевая. Текстуры руд полосчатые вкрапленные, прожилковые, массивные. В данной работе была изучена минерализация золото-каолинит-хлорит-сульфидно-кварцевой стадии.

Методы исследования

Состав рудных минералов изучался на электронном микроскопе Jeol JSM-5300 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром «Link-ISIS», аналитик Н.В. Трубкин, ИГЕМ РАН. Микротермометрия флюидных включений выполнена на термокриокамере Linkam-THMSG-600, ИГЕМ РАН. Томографические исследования проводились на микротомографе Bruker SkyScan-1172, Бельгия, в ресурсном центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования»; ускоряющее напряжение 100 кВ; сила тока 100 мА, фильтр Al + Cu, разрешение 2 мкм; угол поворота образца 0.2°; экспозиция 3.8–5 сек, при повороте на 180° и на 360°. Данные о распределении элементов и ориентировки кристаллов были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N, оснащенного энерго-дисперсионным спектрометром Oxford X-Max 20 и детектором дифракции обратнорассеянных электронов Oxford NordLys Nano в ресурсном центре СПбГУ «Геомодель»; ускоряющее напряжение 30 кВ, ток 2–5 нА, биннинг 4×4 пикселя, усреднение 2-3 кадра и суммарная выдержка 30-60 мкс на пиксель.

Результаты

В изученных образцах минерализация золото-каолинит-хлорит-сульфидно-кварцевой стадии представлена крупными агрегатами сфалерита с пиритом, галенитом, халькопиритом и самородным золотом, окруженными кварц-хлоритовым агрегатом. Содержание Fe в сфалерите от 3 до 8 мас.%, обычно не более 5 мас.%. И сфалерит, и кварц, реже халькопирит густо насыщены включениями самородного золота размером от 10 до 40-50 мкм. В кварце золото образует ксеноморфные выделения, неправильной формы, часто с извилистыми или угловатыми границами. В сфалерите в отраженном свете золото имеет правильную округлую или вытянутую овальную форму (рис. 1А) и в проходящем свете видно, что это дендритовидные образования размером от 0.1 до 1-2 мм (рис. 1Б). Пробность золота не зависит от минерала-матрицы и составляет 621–649. Золотые дендриты распределены в сфалерите довольно равномерно и имеют относительно простое строение: осевой кристалл длиной не более 1 мм и отходящие от него более короткие эпитактические наросты (Рис. 1В). Исследование флюидных включений показало, что минимальные температуры кристаллизации кварца составляют 205 – 245 °С, соленость – от 4.2 до 6.0 мас.%-экв. NaCl; во флюиде преобладал NaCl. Сфалерит кристаллизовался при близких температурах (230–255 °С), из более разбавленных растворов (0.9 – 1.7 мас.%-экв. NaCl), также Na-хлоридного состава (*Грознова, Плотинская, 2010*). Ранее близкие температуры для золото-сульфидно-хлорит-кварцевой ассоциации были ранее получены А.Г. Грановским (1993 г.).

Изучение образцов при помощи дифракции обратно-рассеянных электронов (рис. 2) показало, что для кварца характерна довольно низкая степень кристалличности (рис. 2А, Б). В некоторых случаях для кварца наблюдается глобулярная форма, сложенная радиально-лучевыми двойниками, характерная для образования из силикатного геля. Агрегаты сфалерита сложены хорошо раскристаллизованными хаотично ориентированными субгедральными кристаллами с полисинтетическими двойниками (рис. 2Б, В). Самородное золото в кварце также имеет низкую степень кристалличности, тогда как в сфалерите его степень кристалличности довольно высокая, т.е. дефектность структуры существенно ниже. В плоскости шлифа выделения самородного золота расположены кластерами, в каждом из которых ориентировка кристаллов одинаковая (рис. 2Г) и, по-видимому, каждый такой кластер соответствует отдельному дендриту.

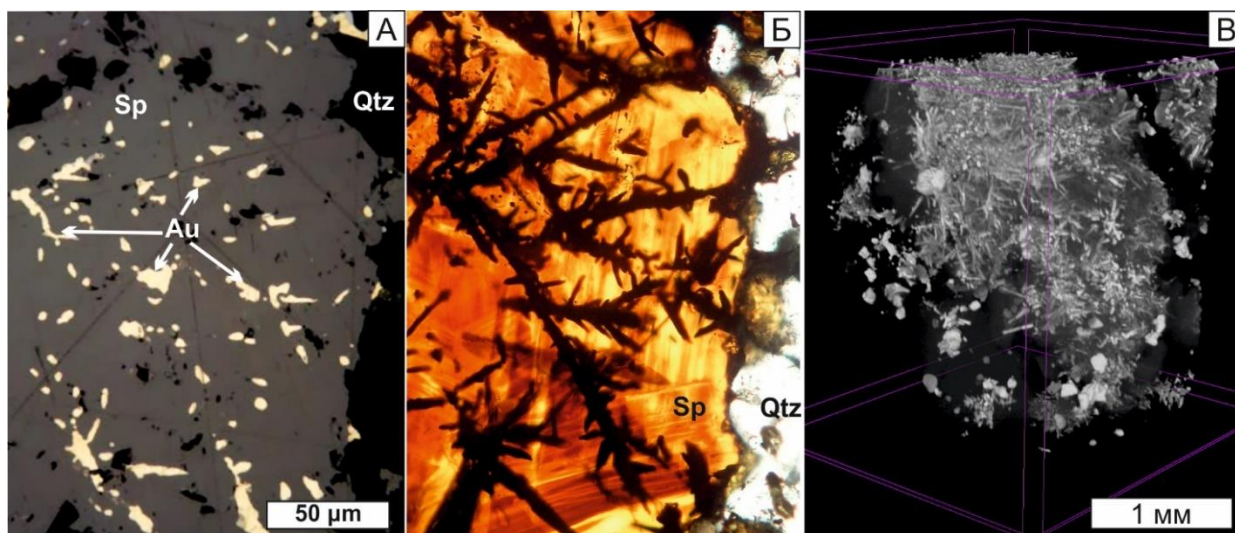


Рисунок 1 – Дендритовидное самородное золото в сфалерите. А, Б– пластинка толщиной 0.5 мм в отраженном (А) и в проходящем (Б) свете; В – распределение дендритов в сфалерите, полученное методом рентгеновской микротомографии. Qtz – кварц, Sp – сфалерит, Au – самородное золото

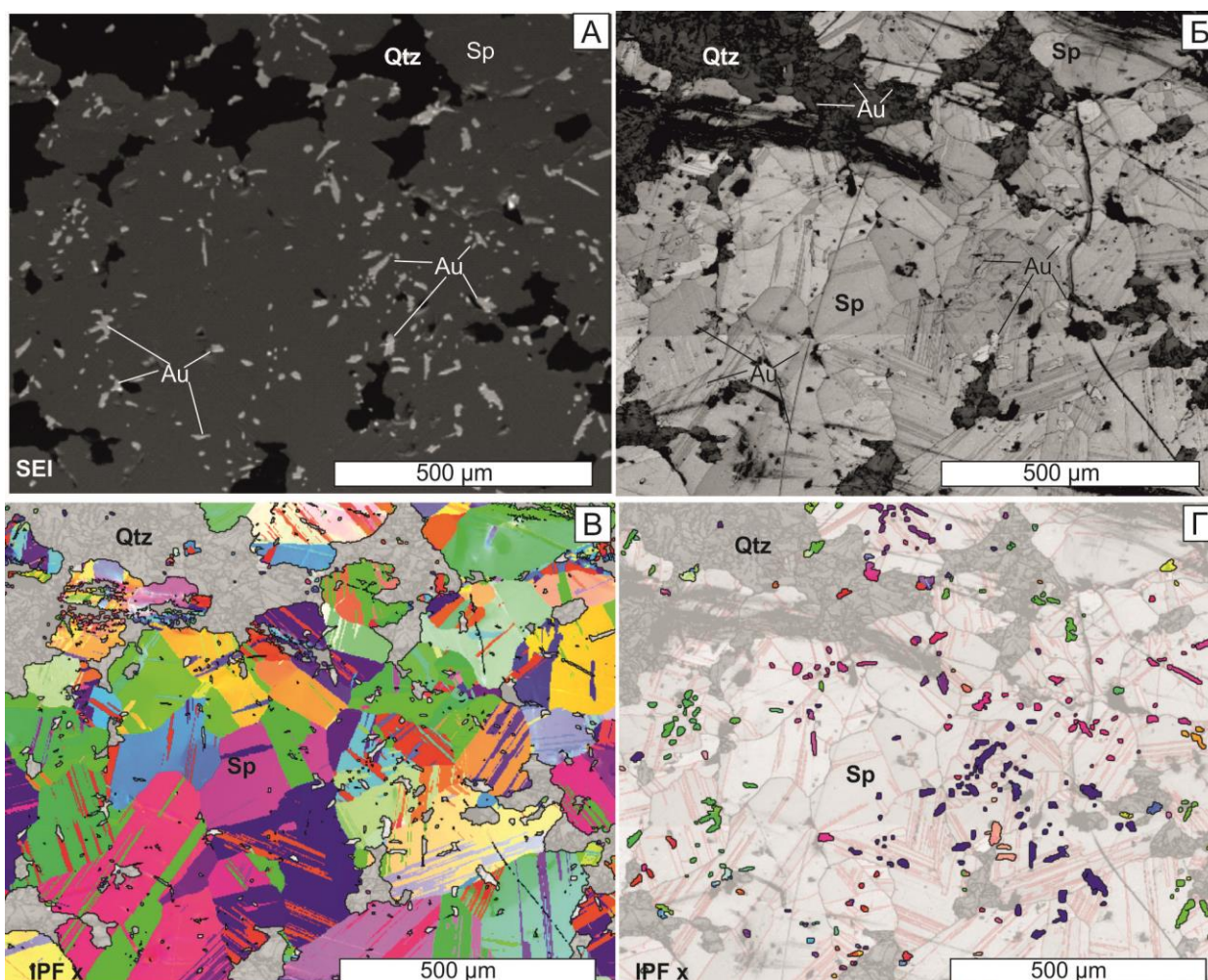


Рисунок 2 – Исследование агрегата кварца, сфалерита и самородного золота при помощи дифракции обратно-рассеянных электронов. А – изображение в обратно-рассеянных электронах; Б – контраст полос; В и Г – карты ориентировок осей IPF x: для сфалерита (В) и для самородного золота (Г), наложенные на карту контраста полос

Обсуждение результатов

В литературе дендритовидные формы выделений минералов традиционно связывают с быстрой кристаллизацией (Рамдор, 1962 и др.). Чаще всего золотые дендриты встречаются

среди халцедоновидного кварца в рудах низкосульфидизированных эпitherмальных месторождений, где также описаны дендриты теллуридов, селенидов и сульфидов (*Tharalson et al., 2023*). Развитие же золотых дендритов внутри кристаллов сфалерита зафиксировано впервые. Для объяснения формирования дендритов на эпitherмальных месторождениях чаще всего привлекают модель осаждения из коллоидного раствора, причем кристаллизация дендритов происходит одновременно с осаждением силикагеля, который позднее перекристаллизовывается в халцедон и кварц (*Tharalson et al., 2023* и цитируемая литература). Низкая степень кристалличности кварца, наблюдаемая в образцах с месторождения Аметистовое, может быть результатом его перекристаллизации из силикагеля или халцедона. По-видимому, одновременно происходила и перекристаллизация самородного золота, находящегося в кварце и это объясняет низкую степень кристалличности этого золота. Соотношение самородного золота со сфалеритом не вполне однозначно. Одновременный рост золотых дендритов и хорошо образованных кристаллов сфалерита маловероятен. Замещение сфалерита самородным золотом по трещинам также можно исключить, т.к. выделения самородного золота не приурочены ни к границам зерен, ни к плоскостям двойникования или спайности сфалерита (рис. 2В, Г). Наиболее вероятной версией является образование золотых дендритов частично в силикагеле, частично в открытом пространстве, и последующее выполнение открытого пространства сфалеритом при одновременной перекристаллизации силикагеля. Это согласуется с тем, что сфалерит кристаллизовался из более разбавленного флюида чем кварц.

Заключение

В рудах месторождения Аметистовое впервые установлено дендритовидное самородное золото, которое приурочено к агрегатам сфалерита. Кристаллизация золотых дендритов происходила частично в силикагеле, частично в открытом пространстве, затем последнее было заполнено сфалеритом с одновременной перекристаллизации силикагеля.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГЕМ РАН

Список литературы

1. Грановский А.Г. Золото-серебряное месторождение Аметистовое (Камчатка) – термобарогеохимия и локальный прогноз / А.Г. Грановский // Руды и металлы. 1993. № 1–2. С. 87–97.
2. Грознова Е.О. Условия образования дендритовидного золота на эпitherмальном золото-серебряном месторождении Аметистовое (Камчатка) / Е.О. Грознова, О.Ю. Плотинская // Современная минералогия: от теории к практике. Материалы докладов XI Съезда РМО, СПб: 2010. С. 175–176.
3. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания / П. Рамдор // М.: Изд-во ил. 1962. 1132 с.
4. NEDRADV сетевое издание <https://nedradv.ru/nedradv/invetsp?obj=37cbccbf7c0d2e5d6f9ac69feaf1efebef#about> (Дата обращения: 20.07.2024).
5. Sillitoe R.H. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits / R.H. Sillitoe, J.W. Hedenquist // Society of Economic Geologists Special Publication. 2003. V. 10. P. 315–343.
6. Tharalson E.R. Textural characteristics of ore mineral dendrites in banded quartz veins from low-sulfidation epithermal deposits: implications for the formation of bonanza-type precious metal enrichment / E.R. Tharalson, T. Taksavas, T. Monecke, T.J. Reynolds, N.M. Kelly, K. Pfaff, A.S. Bell, R. Sherlock // Mineralium Deposita. 2023. V. 58. N. 8. P. 1395–1419.

РАЗДЕЛ II. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ И ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

CHAPTER II. HYDROTHERMAL SYSTEMS, GEOTHERMAL AND HYDROMINERAL RESOURCES

УДК 550.36

Экспериментальные измерения растворимости кварца с высоким разрешением в сверхкритических геотермальных условиях

Бо Фэн, Ченгао Чжун, Чжэнпэн Цуй, Сицин Хэ, Илун Юань

*Ключевая лаборатория ресурсов подземных вод и окружающей среды, Министерство образования,
Университет Цзилинь, Чанчунь 130021, Китай
yuanyl14@mails.jlu.edu.cn*

Кварц – один из самых распространенных минералов в земной коре, состоящий в основном из кремнезема. В сверхкритических геотермальных системах растворение/осаждение кремнезема тесно связано с образованием хрупко/пластичных переходных зон и непроницаемых водоупоров, что существенно влияет на циркуляцию геотермальных флюидов в геотермальной системе. Кроме того, растворение/осаждение кремнезема создает инженерные проблемы для устойчивого производства энергии в сверхкритических геотермальных системах, как, например, прекращение работы исландской скважины IDDP-1 из-за закупорки кремнеземом. Чтобы количественно охарактеризовать эти геохимические процессы, необходимо сначала провести экспериментальные исследования термодинамических и кинетических характеристик растворения кварца в сверхкритических геотермальных условиях.

Ключевые слова: Растворение кварца; сверхкритические геотермальные ресурсы; гидротермальные процессы; поведение ретроградной растворимости; термодинамические данные

High-resolution experimental measurements of quartz solubility under supercritical geothermal conditions

Bo Feng, Chenghao Zhong, Zhengpeng Cui, Siqing He, Yilong Yuan

*Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University,
Changchun 130021, China*

Quartz is one of the most widely distributed minerals in the Earth's crust, mainly composed of silica. In supercritical geothermal systems, the dissolution/precipitation of silica is closely related to the formation of brittle plastic transition zones and impermeable cover layers, which significantly affects the circulation of geothermal fluids in the geothermal system. In addition, the dissolution/precipitation of silica poses engineering challenges for sustainable energy production in supercritical geothermal systems, such as the abandonment of Iceland's IDDP-1 well due to silica blockage. To quantitatively characterize these geochemical processes, it is necessary to first conduct experimental research on the thermodynamic and kinetic characteristics of quartz dissolution under supercritical geothermal conditions.

Keywords: Quartz dissolution; supercritical geothermal resources; hydrothermal processes; retrograde solubility behavior; thermodynamic data

In order to simulate the high-temperature and high-pressure environment in supercritical geothermal systems, we independently developed a high-temperature and high-pressure experimental system that can monitor resistance in situ, as shown in fig. 1. Compared to commonly used reaction vessels, this experimental system has better heating, temperature control, and insulation performance. Through the connection of electrodes, resistance testers, and display

terminals, it can provide intuitive judgment of the equilibrium state of water rock reactions inside the reaction vessel. In addition, in order to improve the accuracy of experimental testing, we independently designed an in-situ separation sampling analysis method, as shown in fig. 2. This sampling and analysis method can minimize the problem of mineral precipitation during the sampling and analysis process. Based on the above experimental system and sampling analysis methods, static reaction thermodynamic experiments and batch reaction kinetics experiments of quartz and pure water were carried out under subcritical (300–374 °C) to supercritical (374–500 °C) temperature range and high pressure (25–50 MPa) conditions to obtain the solubility and reaction rate constants of quartz in pure water under different temperature and pressure conditions.

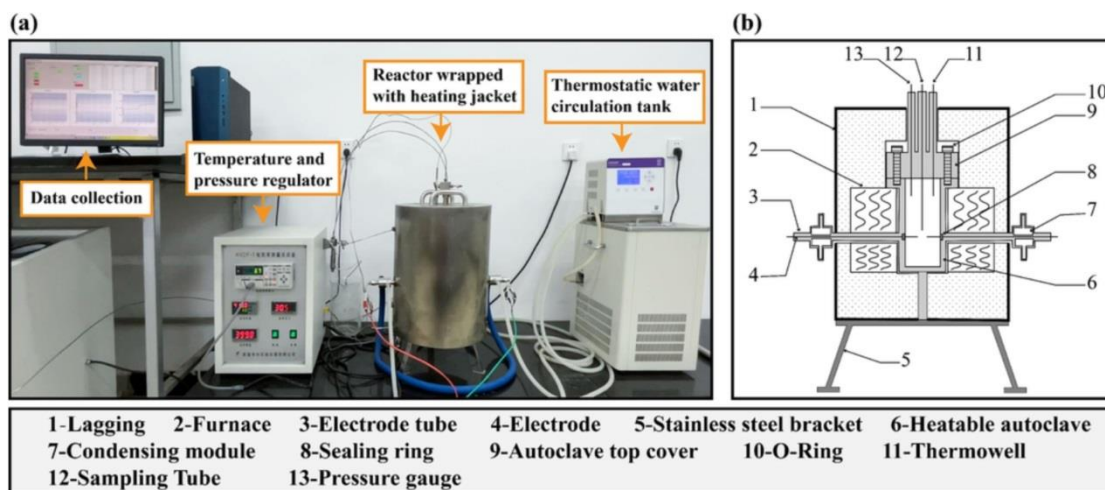


Figure 1 – (a) Experiment system and (b) schematic of the reactor for the quartz dissolution experiment

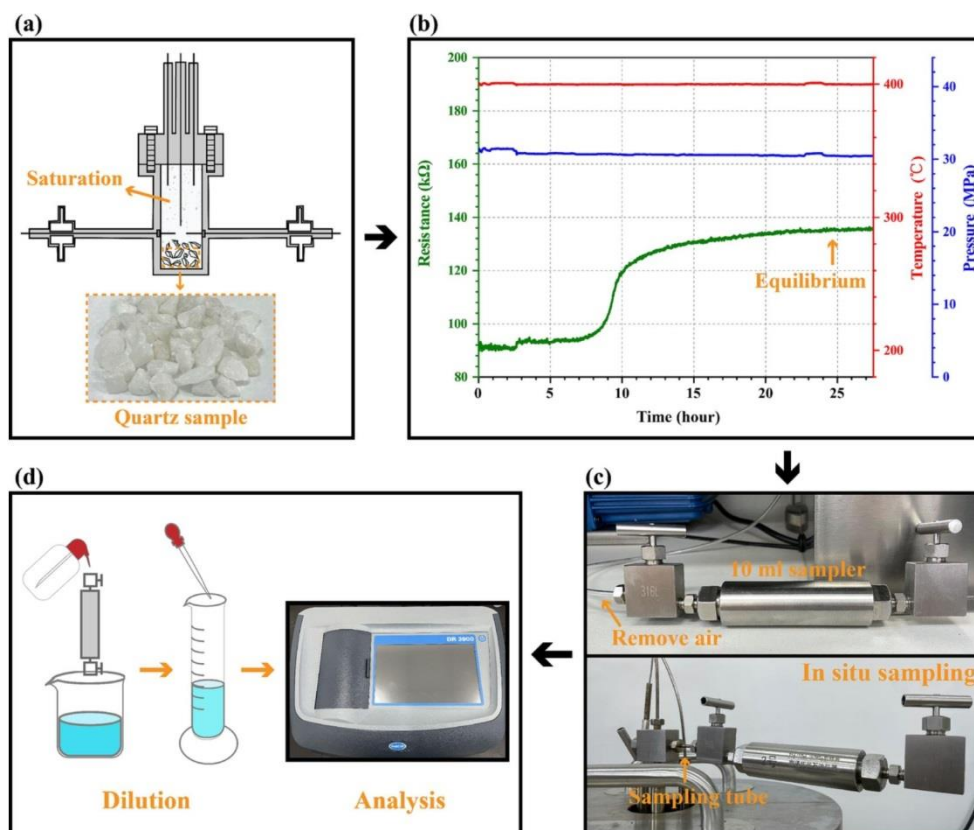


Figure 2 – Experimental procedures: (a) the reactor with pure water and quartz; (b) long time record of temperature, pressure, and resistance; (c) in-situ sampling method; (d) sample analysis

The experimental results indicate that using real-time monitoring of solution resistance and in-situ separation sampling analysis methods can accurately and reliably estimate the solubility of

quartz near the supercritical point and under low density conditions Under subcritical and supercritical conditions, the solubility and reaction rate constant of quartz in pure water are significantly affected by temperature and pressure, while under isothermal conditions, there is a positive correlation with pressure (fig. 3). In addition, the solubility and reaction rate constants of quartz exhibit retrograde behavior under transcritical conditions (fig. 3), which may be related to the drastic changes in water density, dielectric constant, ion product, and hydrogen bonding under transcritical conditions. The above results indicate that the influence of pressure on the thermodynamic and kinetic behavior of quartz dissolution is seriously underestimated. Under supercritical geothermal conditions or in areas with abnormally high compressibility of fluids, the decrease in pressure may become the main factor in the deposition of hydrothermal minerals. By combining the results of this experiment with high-quality data in the literature, thermodynamic and kinetic density models for quartz dissolution were established, which can be used to estimate the solubility and dissolution rate constants of silica in aqueous fluids under normal temperature and pressure to supercritical conditions (fig. 4).

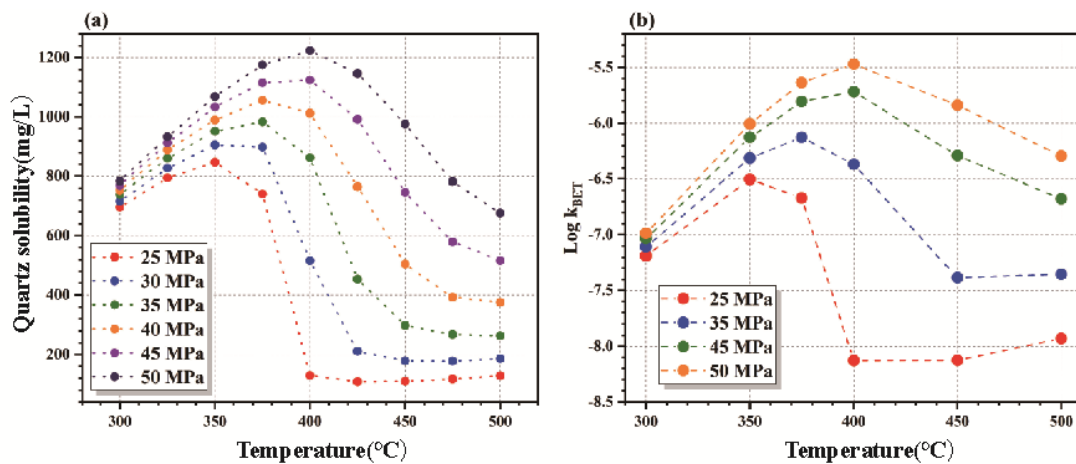


Figure 3 – Temperature dependent curves of (a) solubility and (b) reaction rate constant of quartz under different pressure conditions

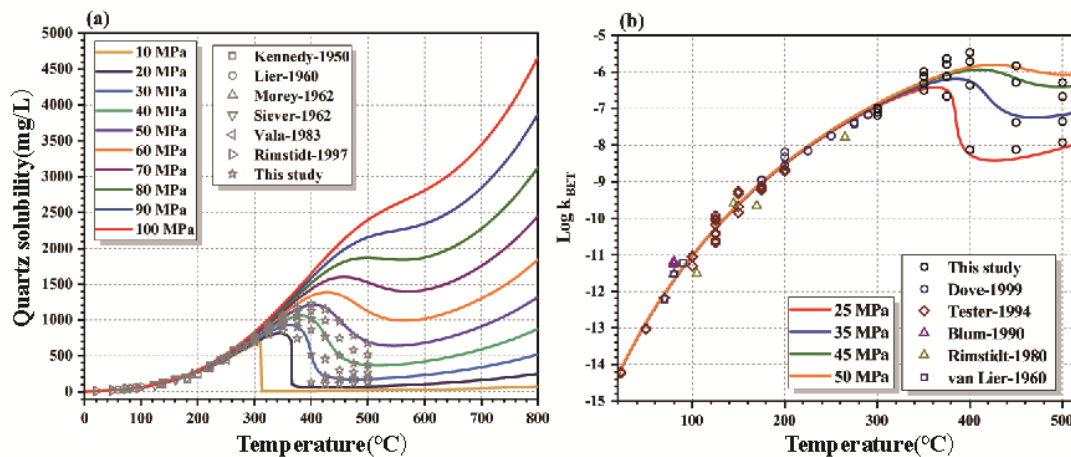


Figure 4 – Quartz solubility(a) and reaction rate (b) constant calculated based on density model

Результат применения тепловизионной аэросъемки с БПЛА в зоне активного вулканизма (Камчатка)

И.А. Нуждаев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
van.one.df@mail.ru*

В работе представлены результаты применения БПЛА на базе квадрокоптера DJI Mavic 3T оснащенного широкоугольной оптической и тепловизионной камерами на гидротермальных системах и на вулканах в фазе извержения. Последующая обработка снимков позволяет получить цифровую модель рельефа, ортофотоплан исследуемого объекта в географических координатах, в видимом и инфракрасном спектрах. В процессе извержения вулкана совместная съемка в двух спектрах с БПЛА дает возможность достоверно определить границы пирокластических потоков, размеры магматических тел с безопасного расстояния.

Ключевые слова: Инфракрасная съемка, квадрокоптер, ортофотоплан, зона активного вулканизма, тепловое поле, лавовый купол

Results of UAV thermal imaging in an active volcanic zone (Kamchatka)

Ivan A. Nuzhdaev

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

The paper presents the results of application of UAV based on DJI Mavic 3T quadcopter equipped with wide-angle optical and thermal cameras on hydrothermal systems and volcanoes in the eruption phase. Subsequent image processing allows to obtain a digital elevation model, an orthophoto of the object under study in geographic coordinates, in visible and infrared spectra. In the process of volcanic eruption, joint imaging in two spectra from UAVs makes it possible to reliably determine the boundaries of pyroclastic flows, the size of magmatic bodies from a safe distance.

Keywords: Infrared imagery, quadcopter, orthophotoplane, active volcanism zone, thermal field, lava dome

Введение

С каждым годом все большую популярность набирает применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для изучения различных геологических объектов. Оснащение беспилотников современным геодезическим, геофизическим, тепловизионным оборудованием делает их мощным инструментом для безопасного исследования активных вулканических процессов. В данной работе представлен результат применения квадрокоптера DJI Mavic 3T оснащенного широкоугольной и тепловизионной камерами. Подробно о характеристиках и применении этого квадрокоптера для изучения термальных объектов Курильских островов представлено в работе (Котенко, 2024), а результаты тепловой съемки на вулканах Эбеко и Алайд (Большаков и др., 2023).

Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) и ортофотоплана местности

В мае 2023 года в Долине Гейзеров проводились режимные наблюдения изменений характера извержений гейзеров, их частоты, силы и продолжительности. Использовались таймлапс камеры, фото и видео съемка, термо- и барометрические логгеры. Одной из задач было с помощью квадрокоптера построить ЦМР и ортофотоплан для вынесения всех активных гейзеров и термальных разгрузок. Успешное использование DJI Mavic 3T позволило построить ортофотоплан в видимом и инфракрасном спектрах (рис. 1). Обработка полученных снимков выполнялась в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional. Визуализация ортофотоплана в инфракрасном спектре позволяет зафиксировать границы термального поля и будет использоваться при дальнейшем мониторинге изменений его размеров.

Аналогичная работа выполнена на Паужетских термальных полях и основных термальных разгрузках Камбального вулканического хребта.

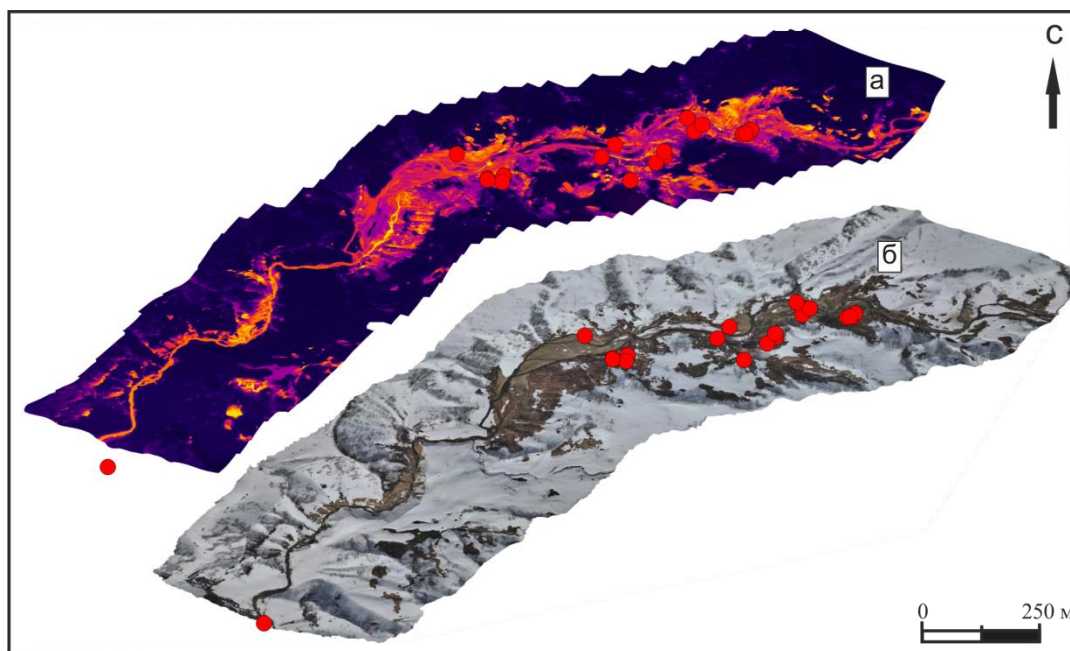


Рисунок 1 – Ортофотоплан Долины Гейзеров в инфракрасном (а) и видимом (б) спектрах. Красным кружком отмечены основные гейзеры, на которых проводились режимные наблюдения

Съемка на вулканах в процессе извержения

7 апреля 2023 года произошло эксплозивное извержение вулкана Безымянный. Пароксизмальная фаза извержения началась в 05:38 UTC – согласно видео и спутниковым данным, эруптивное облако поднялось до 10-12 км н.у.м. (Гирина и др., 2024). Отряд «Эруптивный» Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН находился в непосредственной близости к вулкану, оперативно были отобраны образцы пирокластики, пепел, выполнена фото и видео фиксация события. В 21:28 UTC проведена съемка с квадрокоптера DJI Mavic 3T в видимом и инфракрасном спектрах (рис. 2). Съемка выполнялась на расстоянии 9 км от кратера вулкана, максимальная зафиксированная температура составила 235.9 °С. Кроме того, в инфракрасном диапазоне видна площадь пирокластического потока, а в видимом спектре область распространения пепловых частиц. Обработка полученных снимков выполнялась в программном обеспечении Thermal Analysis Tool 3.

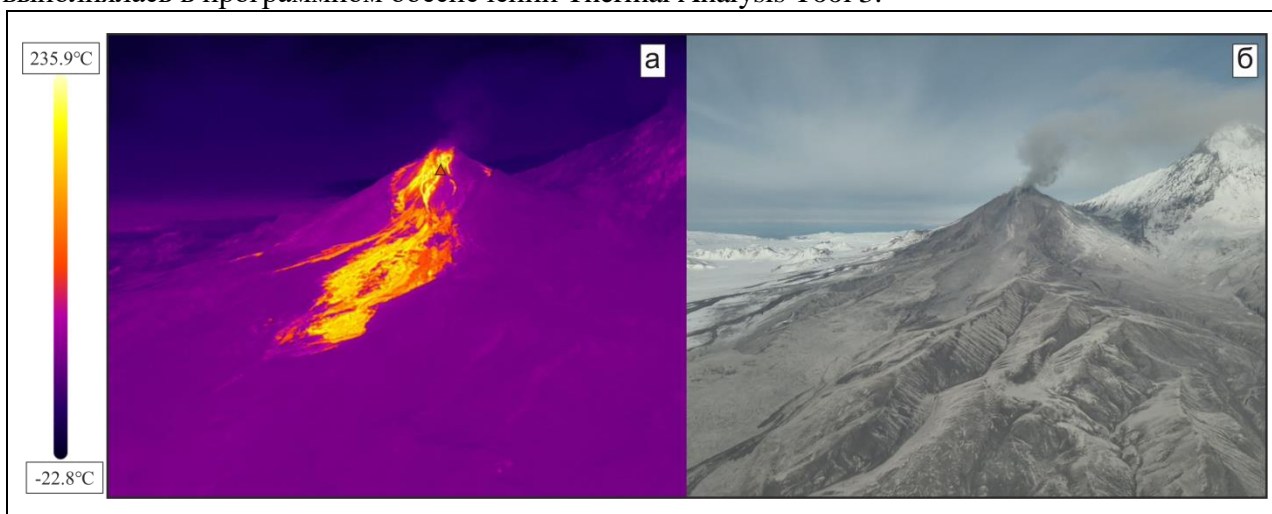


Рисунок 2 – Вулкан Безымянный после эксплозивного извержения 7 апреля 2023 года в инфракрасном (а) и видимом (б) спектрах. Красным треугольником отмечена область максимальной измеренной температурой 235.9 °С

После мощного эксплозивного извержения влк. Шивелуч в апреле 2023 г. резко возросла парогазовая деятельность купола Каран. 26 апреля 2024 г. в районе купола Каран учёные KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) обнаружили яркую термальную аномалию, т.е. в этот день они зафиксировали уникальное явление: рождение нового вулканогенного образования – лавового купола, который назван «300 лет РАН» (Гурина и др., 2024). 8 мая автору удалось добраться до нового купола отобрать образцы породы и сделать фото-видео съемку с квадрокоптера DJI Mavic 3T (рис. 3). Основной особенностью съемки было наличие низкой облачности, а также повышенной парогазовой активности нового купола. В таких условиях оценить размеры нового купола в видимом спектре не представлялось возможным, а в инфракрасном диапазоне вполне возможно. На тот момент высота составляла около 70 м, длина 500 м, ширина 400 м. По состоянию на 7 июня 2024 г. размеры купола «300 лет РАН» составляют: высота 100 м, длина 800 м, ширина 500 м, площадь короны купола 0.19 км² (Гурина и др., 2024). Извержение купола «300 лет РАН» продолжается.

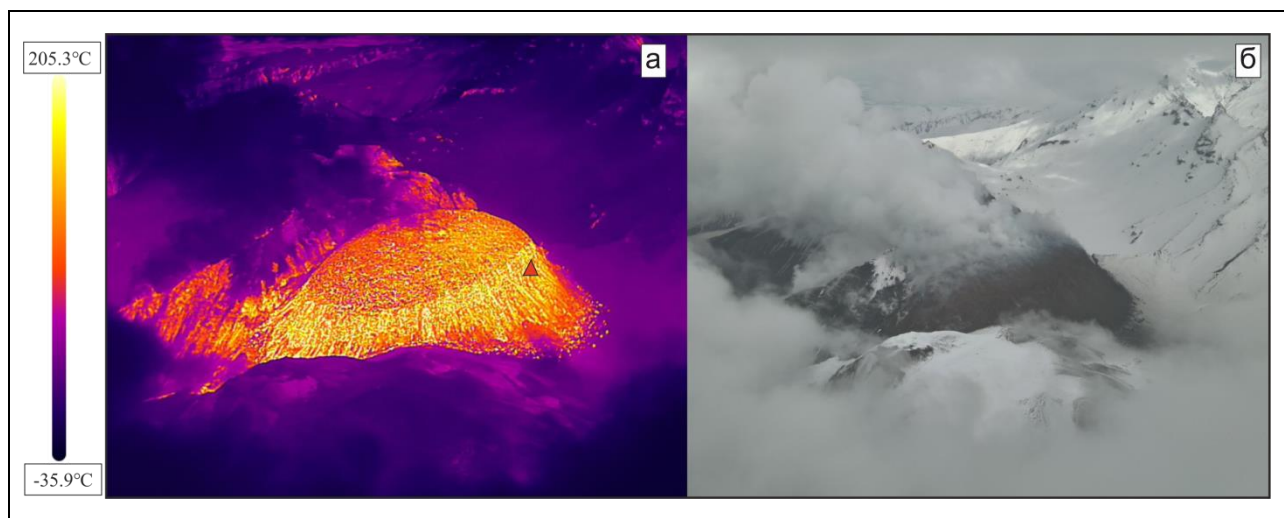


Рисунок 3 – Новый лавовый купол «300 лет РАН» у юго-восточного подножия древнего купола Каран влк. Шивелуч в инфракрасном (а) и видимом (б) спектрах. Красным треугольником отмечена область с максимальной измеренной температурой 205.3 °С

Часть работы выполнена при поддержке РФФ грант № 24-27-20083

Список литературы

1. *Большаков И.Е.* Экспедиция на вулканы Алаид и Эбеко (Курильские острова) летом 2023 года / *И.Е. Большаков, А.А. Нурдаев, Р.А. Кузнецов и др.* // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. Вып. 60. № 4. С. 105–113. DOI:10.31431/1816-5524-2023-4-60-105-113.
2. *Гурина О.А.* Рождение нового экструзивного купола вулкана Шивелуч (Камчатка) в 2024 году по данным непрерывного спутникового мониторинга в информационной системе VolSatView / *О.А. Гурина, А.Г. Маневич, Е.А. Ляпун и др.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 348–355. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-348-355.
3. *Гурина О.А.* Активность вулканов Камчатки и Курил в 2023 г. и их опасность для авиации / *О.А. Гурина, А.Г. Маневич, Д.В. Мельников и др.* // Материалы XXVII конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2024. С. 56-59.
4. *Котенко Т.А.* Первые результаты инфракрасной съемки с БПЛА термальных объектов Курильских островов в 2023 г. / *Т.А. Котенко* // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2024. Вып. 62. № 2. С. 66–78. DOI:10.31431/1816-5524-2024-2-62-66-78.

Методика локальных температурных измерений с помощью ИК-камер на базе беспилотных летательных аппаратов

Б.Е. Резник¹, М.Е. Рахымбердина², Н.А. Зимановская²

¹*Берлинский университет прикладных наук, Берлин, Германия
resnik@bht-berlin.de*

²*Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Казахстан
MRahymberdina@edu.ektu.kz*

Локальные инфракрасные съемки на базе компактных беспилотных летательных аппаратов, выполненные одновременно со съёмкой в видимом диапазоне, способны без дополнительных затрат дать ценную информацию при изучении районов активного вулканизма и гидротермальной деятельности. Авторами предложены методы математического моделирования результатов таких съемок, позволяющие определение абсолютных значений температур во всём исследуемом районе на основе небольшого количества опорных точек с измеренными температурами поверхности.

Ключевые слова: Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), Инфракрасная съёмка, Термические аномалии

Methodology of local temperature measurements with copter-based IR cameras

Boris E. Resnik¹, Marzhan E. Rakhymberdina², Natalya A. Zimanovskaya²

¹*University of applied science BHT Berlin, Germany*
²*Serikbayev East Kazakhstan technical university, Kazakhstan*

Local infrared imaging using unmanned aerial vehicles (UAVs) simultaneously with surveys in the visible range can provide valuable information in the study of areas of active volcanism and hydrothermal activity at no additional cost. The author presents the methods for mathematical modelling of the results of such surveys, which allow determining absolute temperature values in the entire survey area based on a small number of reference points with measured surface temperatures.

Keywords: Unmanned aerial vehicle (UAV), Infrared imaging, Temperature anomaly

Введение

Дистанционные инфракрасные съемки в диапазоне электромагнитных волн от микрометрового (10^{-6}) до миллиметрового (10^{-3}) при помощи аэрокосмических методов уже много десятилетий успешно используются для решения различных задач, в том числе в области геологии (Rahne, 2022). В последние годы такие съёмки могут также выполняться с помощью лёгких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые уже давно заняли свою нишу незаменимых помощников во многих областях современной жизни, включая мониторинг труднодоступных объектов. Ценным преимуществом таких съёмок являются большая разрешающая способность из-за близости к исследуемому объекту, а также оперативное и при необходимости многократное их применение непосредственно при нахождении в исследуемом районе. Аномалии на таких снимках формируются в том числе и за счет тепловых потоков из недр. Поэтому такая локальная инфракрасная съёмка, выполненная одновременно со съёмкой в видимом диапазоне и последующим картированием местности, способна без дополнительных затрат дать важную дополнительную информацию при изучении районов активного вулканизма и гидротермальной деятельности. Полученные карты распределения температур на земной поверхности могут при этом служить как самостоятельным источником геотермической информации, так и для расчетов тепловых потоков. Обработка и анализ полученных инфракрасных снимков имеют много общего с дешифрированием снимков видимого диапазона, но в то же время и существенные отличия.

Качественная интерпретация инфракрасных снимков сводится к выделению локальных аномалий термического поля и сопоставлению их с аномалиями других геофизических методов, а также с геологическими данными. При количественной интерпретации результатов необходимы не только градиенты температур на поверхности, но и их абсолютные значения. По зарегистрированному тепловому излучению определяется так называемая «радиационная температура», которая обычно ниже физической, поскольку она зависит от излучательной способности объекта и от ослабления излучения атмосферой. Кроме того такая съемка документирует излучение поверхности, определяемое как собственной температурой геологических тел, так и отраженным солнечным излучением. Этот недостаток инфракрасных съёмок может быть устранён с помощью описанных в статье методов математического моделирования на основе небольшого количества опорных точек с достоверно измеренными температурами поверхности.

Обработка ИК-изображений

Собирающая линза ИК-камеры фокусирует реальное тепловое излучение объекта измерений на ИК-детектор (рис. 1), который преобразует поглощенное излучение в цифровой электрический сигнал. Этот сигнал пропорционален интенсивности зарегистрированного излучения и на следующем этапе может быть представлен как двумерное цифровое монохромное изображение с 8-битной шкалой яркости (от 0 до 255). Дальнейшее преобразование этих величин в реальные температуры поверхности связано с многочисленными сложностями. Спектр излучения «серого тела» совпадает с таковым у «абсолютно чёрного тела», отличается однако всегда меньшей интенсивностью (коэффициент ε). Реальные материалы обладают очень сложными эмиссионными свойствами, зависящими от соответствующих частот, что ещё более усложняет анализ полученной информации (Bernhard, 2014).

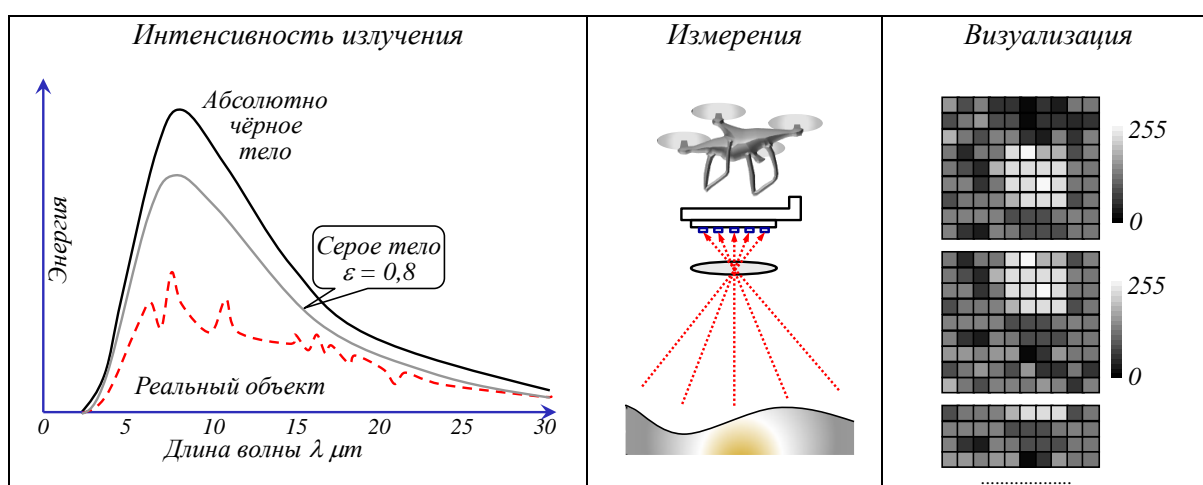


Рисунок 1 – Принцип инфракрасной съёмки

В связи с тем, что и высота полёта БПЛА и разрешающая способность ИК-камер весьма ограничены, съемка сравнительно больших площадей более одного гектара выполняется всегда с помощью нескольких отдельных ИК-фотографий, которые для последующего совместного анализа должны быть соединены в одно крупномасштабное изображение без пропусков и наложений, так называемую фотомозаику. Необходимая для этого геометрическая трансформация снимков в единую систему двухмерных координат выполняется с помощью общих контрольных точек на отдельных изображениях. Нахождение таких точек на инфракрасных фотографиях зачастую сложнее, чем при съемках в видимом диапазоне и требует наложения на них соответствующих RGB-изображений. Каждое отдельное инфракрасное изображение имеет своё индивидуальное распределение значений шкалы яркости в соответствии с энергией, которое отражает различные диапазоны интенсивности излучения по всей площади каждой конкретной фотографии. Отдельные

изображения не соответствуют друг другу с точки зрения радиометрических свойств и их цветовая классификация может соответствовать совершенно различным энергиям или температурам. По этой причине для формирования «фотомозаики» помимо пространственной привязки отдельных фотографий необходимо обеспечить единую шкалу яркости в изображениях.

Для того чтобы преобразовать все изображения к единой температурной классификации, их необходимо предварительно модифицировать. Такая адаптация отдельных изображений может выполняться в два этапа (рис. 2). На первом этапе обработки создаются отдельные температурные матрицы для каждой фотографии. Для такого преобразования используются измеренные значения температур (t) для отобранных контрольных точек изображений и соответствующие значения яркости (g). Затем на их основании вычисляются параметры регрессионных прямых и значения температур для всех элементов цифрового изображения (матрица температур). На втором этапе обработки значения яркости (цвета) на всех фотографиях приводятся к единой шкале температур. Самый простой способ для этого преобразования – это фиксация максимальной и минимальной температуры для всех используемых изображений и последующая интерполяция на всю шкалу интенсивностей (от 0 до 255) с помощью новой регрессионной прямой на основании подготовленных матриц температур. За исключением локальных измерений в характерных точках, например обычными цифровыми термометрами, все описанные вычисления и преобразования выполняются автоматически с помощью подготовленных программ.

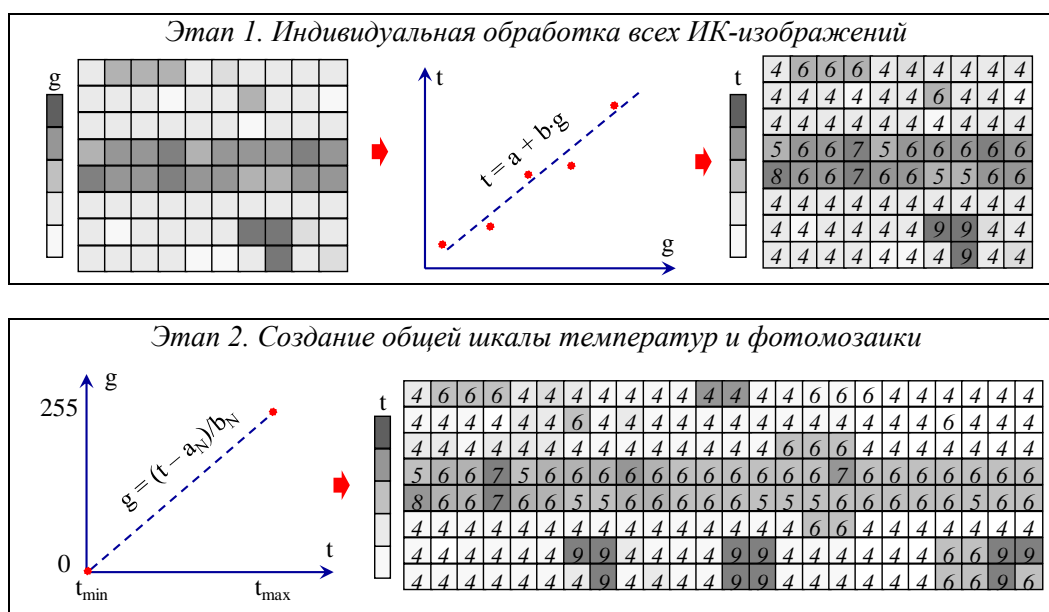


Рисунок 2 – Методика преобразования ИК-изображений

Многие проекты, выполненные авторами в последние годы, доказали, что и предложенная методика и программное обеспечение позволяют успешно проводить обработку ИК-съемок и их последующую интерпретацию с анализом температур поверхности. Наиболее известным применением инфракрасных съёмок является строительная термография в целях визуализации тепловых потерь в зданиях и выполнения последующих теплоизоляционных мер. Преобразование снимков (БПЛА) и интерпретация температур отдельных участков фасада и крыши здания при таких съёмках проиллюстрированы на рис. 3. На этом примере особенно хорошо видны различия между первым снимком (ИК 1) и двумя соседними с перекрывающимися изображениями, поскольку в верхней части этой фотографии частично запечатлено небо. Полученная область с фиктивными отрицательными температурами изменила всю шкалу цветов этого изображения и радиометрические различия снимков настолько велики, что объединение их в одну общую мозаику стало практически невозможно. С помощью описанной методики все

изображения были приведены к общей температурной шкале и обеспечили объединение и последующий совместный анализ.

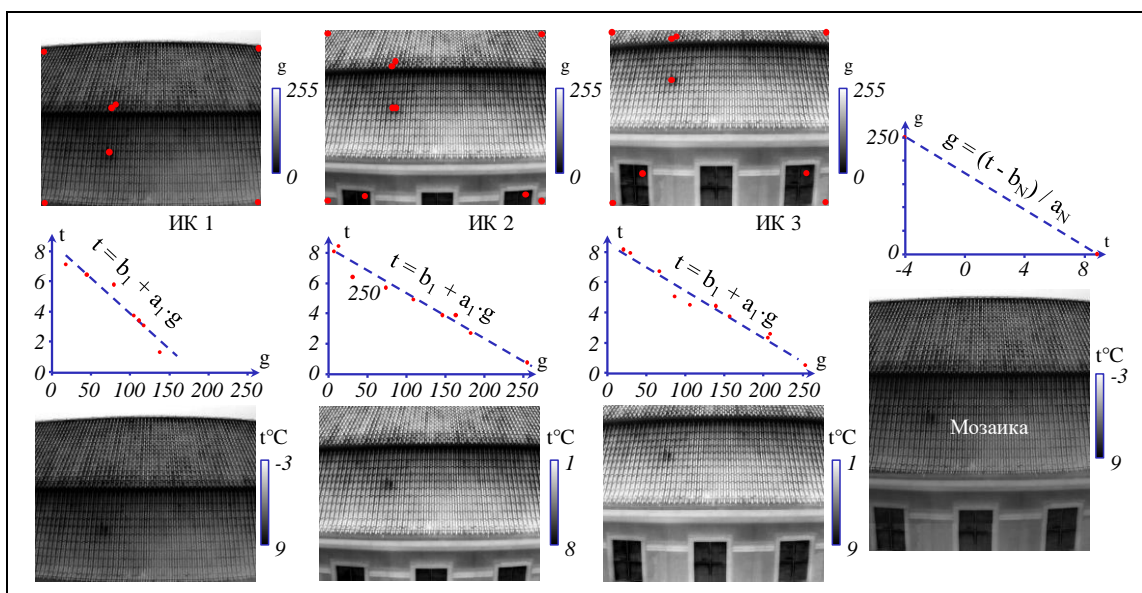


Рисунок 3 – Применение методики при съёмке фасада

На рис. 4 в качестве примера показаны результаты обработки трёх отобранных снимков съёмки земной поверхности при помощи БПЛА и их последующей обработки с целью получения общего изображения и единой температурной шкалы.

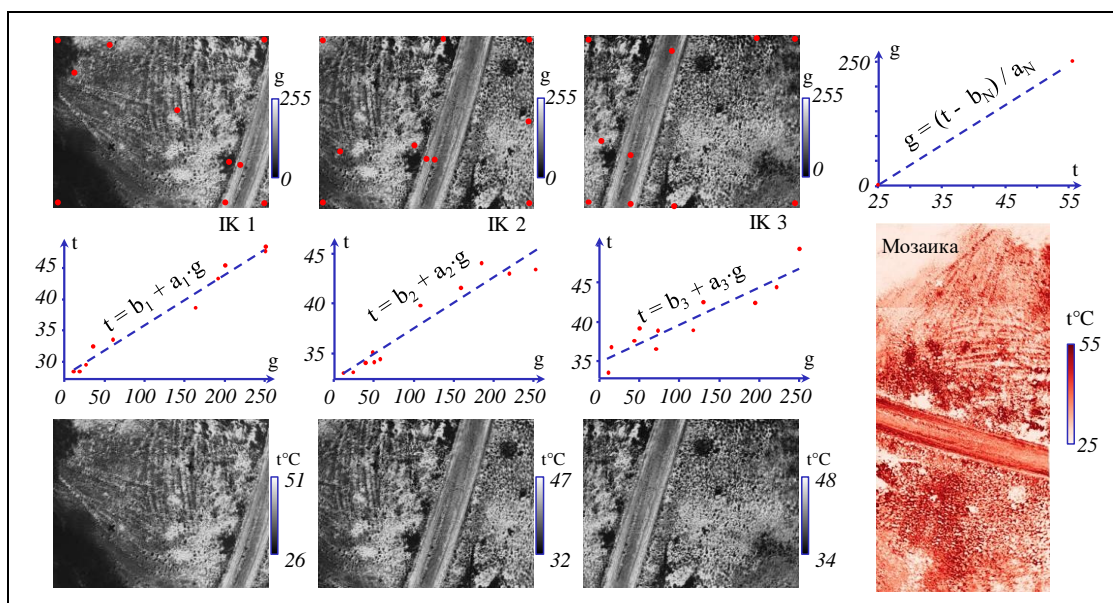


Рисунок 4 – Применение методики при съёмке земной поверхности

На основании накопленного опыта авторы убеждены, что описанные методы обработки инфракрасных съёмок могут успешно применяться и при изучении районов активного вулканизма и гидротермальной деятельности. Практическая реализация таких задач потребует интенсивной совместной работы специалистов различных специальностей, в первую очередь, в области геодезии и геологии.

Список литературы

1. *Rahne E.* Thermografie: Theorie, Messtechnik, Praxis, Berlin, Wiley-VCH, 2022. 720 с.
2. *Bernhard F.* Handbuch der Technischen Temperaturmessung, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014, 1643 с.

Численный анализ теплопритоков к геотермальному теплообменнику с учетом испарения влаги в его конструкции

В.Ю. Половников

*Томский политехнический университет, Томск, Россия
polovnikov@tpu.ru*

Установлено, что увеличение влажности песчаной засыпки геотермального теплообменника приводит к росту теплопритоков на 3.2–7.8%. Выявлено существенное влияние нестационарности процессов переноса на интенсификацию теплообмена в рассматриваемой системе. Показано, что вклад эффекта испарения в теплопритоке к геотермальному теплообменнику составляет около 22%. Обоснован вывод о том, что при выборе варианта регулирования тепловых режимов геотермальных теплообменников следует преимущественно изменять объемную влажность песчаной засыпки.

Ключевые слова: геотермальная энергия, геотермальный теплообменник, математическое моделирование, теплопритоки

Numerical analysis of heat gain to geothermal heat exchangers with moisture evaporation in the structure

Viacheslav Yu. Polovnikov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

It has been established that an increase in the humidity of the sand backfill of a geothermal heat exchanger leads to an increase in heat inflows by 3.2–7.8%. A significant influence of the unsteadiness of transfer processes on the intensification of heat transfer in the system under consideration was revealed. It has been shown that the increase in heat flow to the geothermal heat exchanger due to the presence of evaporation is about 22%. The conclusion is substantiated that when choosing an option for regulating the thermal conditions of geothermal heat exchangers, the volumetric humidity of the sand backfill should be primarily changed.

Keywords: geothermal energy, geothermal heat exchanger, mathematical modeling, heat gain

Введение

Отдельной областью в сфере моделирования геотермальных технологий является исследование тепловых режимов геотермальных теплообменников (ГТ). Конструктивно наиболее типичный ГТ представляет собой теплообменник типа «труба в трубе» установленный в скважине (рис. 1). Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между ГТ и окружающей его средой приводит к использованию разнообразных засыпок. В качестве засыпок используются различные материалы: от обычного цемента до материалов с фазовыми переходами. Однако использование этих материалов заметно повышает и без того существенные капитальные затраты при строительстве скважин с геотермальными теплообменниками. Предложено использовать в качестве засыпки распространенный и недорогой материал – увлажненный песок. Использование увлажненного песка в качестве засыпки для ГТ неизбежно будет связано с наличием фазовых переходов и изменением механизмов теплопереноса в конструкции геотермального теплообменника.

Постановка задачи

Прототипом рассматриваемой конструкции ГТ является реальный объект, геометрические и физические параметры которого описаны в (Сао *et. al.*, 2022). Обсадная колонна, выполняющая роль несущей конструкции, выполнена из высокопрочного бетона, а кольцевой канал ГТ из стали. На рис. 2 приведена схема области решения.

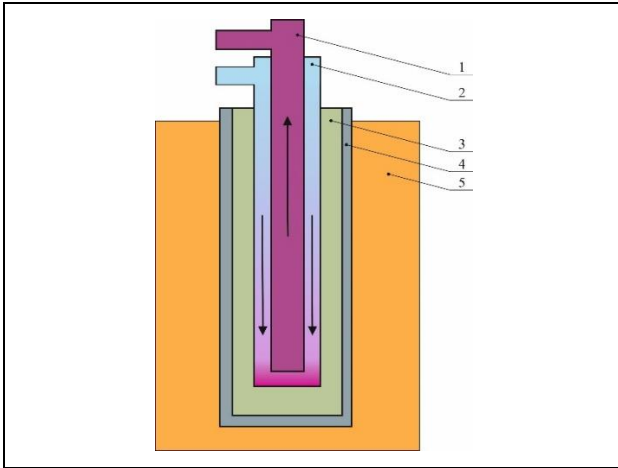


Рисунок 1 – Схема скважины с ГТ:
 1 – внутренняя труба; 2 – кольцевой канал;
 3 – засыпка; 4 – обсадная колонна;
 5 – горячие породы

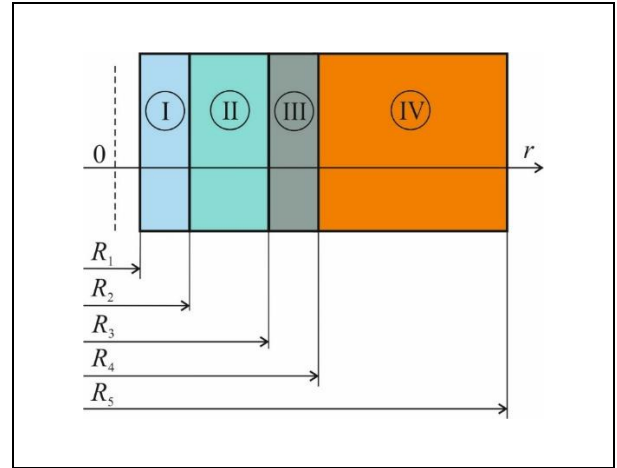


Рисунок 2 – Схема области решения:
 I – внешняя труба кольцевого канала ГТ;
 II – засыпка; III – обсадная колонна;
 IV – горячие породы

Предполагается, что до начала эксплуатации ГТ в рассматриваемой области решения (рис. 2) поддерживается постоянная температура, равная температуре горячих пород. В момент времени отличный от нуля через ГТ начинает прокачиваться энергоноситель, температура которого ниже, чем начальная температура в области решения. На границе R_1 вводятся граничные условия третьего рода, а на границе R_5 выставляются граничные условия первого рода. Влага, наполняющая поры песчаной засыпки II, на границе контакта (R_3) с разогретой конструкцией обсадной колонны III испаряется. Образовавшийся пар диффундирует в зону меньших концентраций. На поверхности R_2 происходит конденсация пара с выделением тепла (рис. 2).

Математическая модель

Уравнения теплопроводности и соответствующие им краевые условия для рассматриваемой области решения (рис. 2) имеют следующий вид:

$$\tau \geq 0, R_1 \leq r \leq R_5; c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right); i = I - IV; \quad (1)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_5; T_i = T_0 = \text{const}; i = I - IV; \quad (2)$$

$$\tau > 0, r = R_1; \alpha(T_{r=R_1} - T_{in}) = -\lambda_I \frac{\partial T_I}{\partial r}; \quad (3)$$

$$\tau > 0, r = R_2; \lambda_I \frac{\partial T_I}{\partial r} = \lambda_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial r} + Jq; T_I = T_{II}; \quad (4)$$

$$\tau > 0, r = R_3; \lambda_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial r} = \lambda_{III} \frac{\partial T_{III}}{\partial r}; T_{II} = T_{III}; \quad (5)$$

$$\tau > 0, r = R_4; \lambda_{III} \frac{\partial T_{III}}{\partial r} = \lambda_{IV} \frac{\partial T_{IV}}{\partial r}; T_{III} = T_{IV}; \quad (6)$$

$$\tau > 0, r = R_5; T_V = T_{ex} = \text{const}. \quad (7)$$

Теплофизические свойства песчаной засыпки, при известных плотности ρ и объемной влажности W , вычислялись из следующих соотношений:

$$\lambda_{II} = -1.337 + 0.00125\rho + 0.01 W; \quad (8)$$

$$c_{II} = -0.018 + 0.0009\rho + 0.031 W. \quad (9)$$

Для расчета коэффициентов теплоотдачи в канале кольцевого поперечного сечения использовалось уравнение:

$$Nu = 0,017 Re^{0.8} Pr_e^{0.4} \left(\frac{Pr_e}{Pr_w}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0.18}, \quad (10)$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_e}; \quad Re = \frac{Vd}{\nu_e}; \quad d = d_2 - d_1.$$

Коэффициент аккомодации, скорость и теплота фазового перехода вычислялись из соотношений:

$$a = \frac{0.059}{P_s^{0.5}}; \quad J = \frac{a(P_s - P_p)}{\left(\frac{2\pi R_g T}{M}\right)^{0.5}}; \quad q = 2500.64 - 2.369T|_{r=R_2}. \quad (11)$$

Обозначения: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ρ – плотность, кг/м³; ν – кинематическая вязкость, м²/с; τ – время, с; R – граница области расчета, м; T – температура, К; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); r – координата, м; V – скорость, м²/с; W – объемная влажность, %, d – эквивалентный диаметр, м; d_2, d_1 – внешний и внутренний диаметры кольцевого канала, м; Nu, Re, Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; $\pi = 3.14$; a – коэффициент аккомодации; J – скорость испарения, кг/(м²·с); M – молекулярная масса паров, кг/моль; P – давление, Па; q – теплота фазового перехода, Дж/кг; R_g – газовая постоянная, Дж/(кмоль·К), Q – теплопритоки, Вт/м; 0 – начальный момент времени; 1, 2, 3, 4, 5 – номера границ областей расчета (рис. 2); in – внутренний; ex – наружный; e – жидкость (энергоноситель); w – стенка; p – парциальный; s – насыщение; I, II, III, IV – номера областей расчета (рис. 2).

Метод решения и исходные данные

Решение задачи (1)–(7) получено методом конечных разностей. Использовалась неявная разностная схема и алгоритм прогонки. Геометрические параметры ($R_1=0.05$ м; $R_2=0.055$ м; $R_3=0.14$ м; $R_4=0.25$ м) соответствовали конструкции скважины, описанной в (Cao et al., 2022), а $R_5=10$ м. Внешний и внутренний диаметры кольцевого канала составляли: $d_2=2 \cdot R_1$; $d_1=0.06$ м. Начальная температура T_0 принималась равной температуре разогретых пород $T_{ex}=373.15$ К. Температура прокачиваемого энергоносителя составляла $T_{in}=278.15$ К. Объемная влажность песчаной засыпки W варьировалась от 5% до 25%. Расход энергоносителя задавался от 0.004 до 0.04 м³/с. Теплофизические характеристики, использовавшиеся при проведении моделирования, приведены в табл.

Таблица. Теплофизические характеристики

Характеристика	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
Кольцевой канал	57.5	466	7860
Засыпка	Расчет по (8)	Расчет по (9)	1900
Цемент	1.78	800	2490
Горячие породы	1.3	775	1990

Результаты численного моделирования

Рис. 3 иллюстрирует типичную картину снижения теплопритоков Q к ГТ во время эксплуатации при фиксированной скорости движения энергоносителя по кольцевому каналу ($V=1.0$ м/с), различных значениях объемной влажности песчаной засыпки W и учете испарения влаги в засыпке. Изменение величин теплопритоков к ГТ свидетельствуют об их ожидаемом снижении с увеличением длительности эксплуатации из-за охлаждения горячих пород в непосредственной близости от скважины (рис. 1) и закономерном увеличении при росте W , сопровождающимся изменением теплофизических характеристик засыпки в соответствии с формулами (8) и (9). Время эксплуатации ГТ (6 месяцев) выбрано исходя из соответствия типичной для РФ продолжительности отопительного периода.

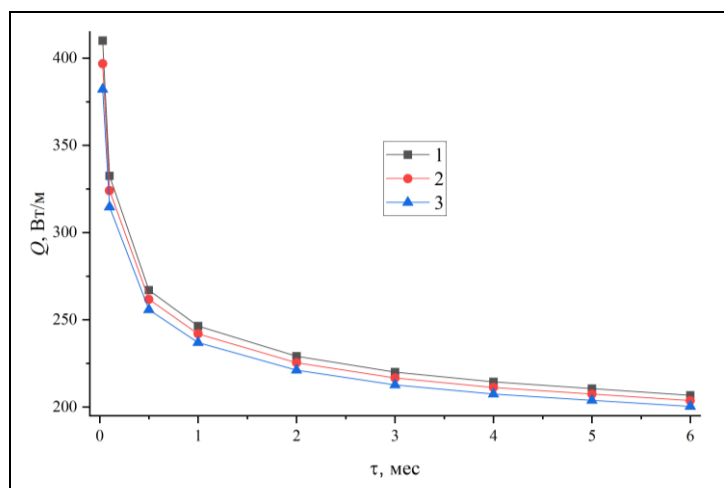


Рисунок 3 – Снижение теплопритоков к ГТ:
1 – $W = 25\%$; 2 – $W = 15\%$; 3 – $W = 5\%$

Анализ нестационарности процессов теплопереноса в рассматриваемой системе в период установления стационарного температурного поля в горячих породах свидетельствует о её существенном влиянии на уровень теплопритоков к ГТ. За рассматриваемый период эксплуатации (6 месяцев) теплопритоки к ГТ снижаются практически в 2 раза по сравнению с первоначальным уровнем. Исследование влияния влажности песчаной засыпки ($W = 5–25\%$) на теплопритоки в конструкции ГТ позволило сделать вывод об увеличении теплопритоков до 7.8% в начальный период эксплуатации ГТ и до 3.2% к концу этого периода. Анализ влияния интенсивности теплоотдачи в кольцевом канале на изменение теплопритоков к ГТ позволяет сделать вывод о незначительном росте тепловых потерь в рассматриваемой системе (около 1–2.5%). Это объясняется достаточно быстрым установлением постоянной температуры на внешней трубе кольцевого канала ГТ. Следовательно, при решении задач, подобных задаче (1)–(7), для исследования тепловых режимов ГТ можно обоснованно, вместо выражения (3) использовать граничные условия первого рода. Таким образом, при выборе варианта регулирования тепловых режимов ГТ следует преимущественно изменять объемную влажность песчаной засыпки W . Анализ свидетельствует о существенном вкладе процесса испарения влаги в засыпке ГТ на интенсификацию теплопритоков к нему. Рост теплопритоков к ГТ с учетом наличия испарения составляет около 22% по сравнению с аналогичным исследованием без учета этого эффекта.

Работа выполнена при поддержке РФФ по проекту 23-29-00464

Список литературы

1. Cao Z. Influence of backfilling phase change material on thermal performance of precast high-strength concrete energy pile / Z. Cao, G. Zhang, Y. Liu, X. Zhao, C. Li // Renewable Energy. 2022. V. 184. P. 374–390. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.100.

Текущий статус геологоразведочных работ на геотермальных лицензионных участках Компании АО «Зарубежнефть» на полуострове Камчатка

Э.К. Хмарин¹, Т.С. Баранов²

¹ООО «ЗН Геотерм» (ГК АО «Зарубежнефть»), Россия
EKhmarin@nestro.ru

²АО «ВНИИнефть» (ГК АО «Зарубежнефть»), Россия
TBaranov@vniineft.ru

Для развития геотермальной энергетики в Камчатском крае Компанией Зарубежнефть приобретены Верхнежировской, Корякско-Кеткинский и Больше-Баннный лицензионные участки. Для открытия перспективных геотермальных зон Компанией применяется комплексный подход, сочетающий геологические, геофизические и геохимические методы. В работе отражены результаты полевых и камеральных работ 2024 года, планы на 2024 и 2025 годы.

Ключевые слова: геологоразведочные работы, геотермальная энергетика, теплоэнергетические подземные воды, Камчатка

Current status of geological exploration work at the geothermal license areas of the Zarubezhneft JSC Company on the Kamchatka Peninsula

Eduard K. Khmarin¹, Timofei S. Baranov²

¹ZN Geotherm (Zarubezhneft), Russia

²Vniineft (Zarubezhneft), Russia

To develop geothermal energy in the Kamchatka Territory, Zarubezhneft Company acquired Verkhnezhirovskoy, Koryaksko-Ketkinsky and Bolshe-Banniy license areas. To discover promising geothermal zones, the Company uses an integrated approach combining geological, geophysical and geochemical methods. The work reflects the results of field and office work in 2024, plans for 2024 and 2025.

Keywords: geological exploration, geothermal energy, heat and energy groundwater, Kamchatka

Введение

Камчатский полуостров – жемчужина геотермальной энергетики России. Открытые месторождения – чистый источник энергии и основа для научного и технологического развития региона. Для развития энергетики в Камчатском крае Компанией Зарубежнефть приобретены Верхнежировской и Корякско-Кеткинский поисковые участки и разведанное в середине прошлого века Больше-Банное месторождение (рис. 1).

Комплексирование методов

Учитывая сложное геологическое строение региона, для открытия перспективных зон необходим комплексный подход, сочетающий геологические, геофизические и геохимические методы (Шварц и др. 1990). Опыт работ на территории Мутновского лицензионного участка показал, что хорошие результаты могут быть получены с использованием электроразведочных методов МТЗ и АМТЗ, проведение которых не требует больших технических и материальных ресурсов, позволяя получить при этом надежную информацию о строении территории до глубин более 5 км (Нурмухамедов и др., 2005). Для повышения детальности в изучении верхней части разреза (ВЧР) и повышения надежности построения моделей будут применены метод электротомографии и бесконтактного электромагнитного картирования (георадар). Материалы пассивной сейсморазведки с высокой степенью достоверности позволят получить информацию о расположении магматических тел, ответственных за формирование геотермальной активности. Таким

образом, используя сочетание четырех независимых геофизических методов (электроразведочных методов АМТЗ + МТЗ и ЭТ, георадара и пассивной сейсморазведки) предполагается получить единые геолого-геофизические разрезы от дневной поверхности до целевых глубин в 5–6 км.

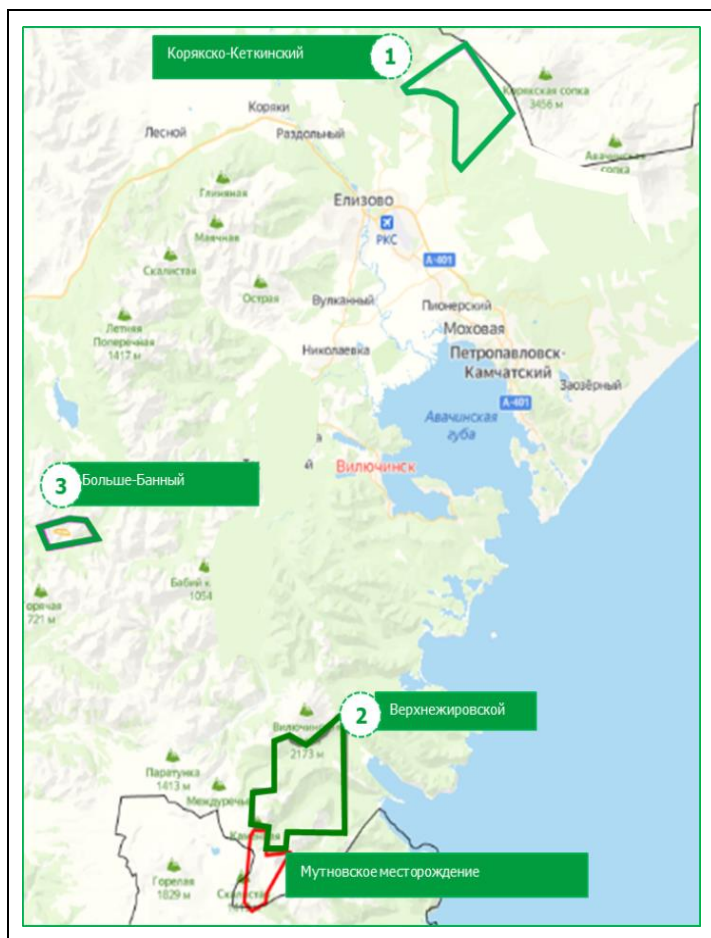


Рисунок 1 – расположение лицензионных участков АО «Зарубежнефть» на п-ов Камчатка

В дополнение к геофизическим методам запланированы полевые геолого-гидрогеологические работы с проведением наземных геологических маршрутов, изучении опорных разрезов, картировании горячих источников и отборе точечных проб. Для решения задачи также необходимо изучение геологической структуры, особенностей залегания пород, контактов различных геологических тел, осадочных и вулканогенно-осадочных пород, их взаимоотношений с подстилающими и перекрывающими отложениями ассоциаций и формаций магматических пород и зон разломов.

Для исследования вод будет проведен отбор проб на химический анализ. Химический анализ проб воды включает определение: общей минерализации, общей жесткости, рН, макрокомпонентов (Na, K, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄), Fe, SiO₂, CO₂св., Zn, Cu, Pb). В полевой сезон 2023 года проведена первая стадия геологического изучения Корякско-Кеткинского и Верхнежиривского участков.

Корякско-Кеткинский. Электроразведка

По участку реализуется программа ГРП утвержденная в проектных документах на геологическое изучение недр. Корякско-Кеткинский ЛУ расположен в 16 км на северо-восток от г. Elizovo у подножья юго-западного склона вулкана Корякская Сопка, характеризуется пологим рельефом. На поверхности четвертичные терригенные отложения и базальтовые покровы Корякского вулкана. В Северо-Западной части участка – экструзия андезитов и дацитов. В 14 км к западу на поверхность выходят меловые породы. Тектонически участок приурочен к Авачинской депрессии. С запада расположено Кеткинское месторождение термальных вод. На участке, проведена съемка электроразведочных работ методом МТЗ, выполнено 293 точки. Выполнена 2D и 3D обработка данных. Проведена интерпретация данных и разработана концептуальная модель участка и окружения.

Перспективная зона связывается с предполагаемым выступом фундамента и дизъюнктивными нарушениями (рис. 2), определена точка и траектория первой поисковой скважины.

Верхнежировской. Сейсмотомография

Верхнежировской участок входит в состав Мутновского геотермального района, приуроченного к центральной части южного сегмента Восточно-Камчатского вулканического пояса. Поисковыми работами выявлено несколько участков термопроявлений. В тектоническом плане Верхнежировский лицензионный участок располагается в пределах Жировской купольно-кольцевой ВТС II порядка, расположенной в Вилючинской гетерогенной ВТС I порядка.

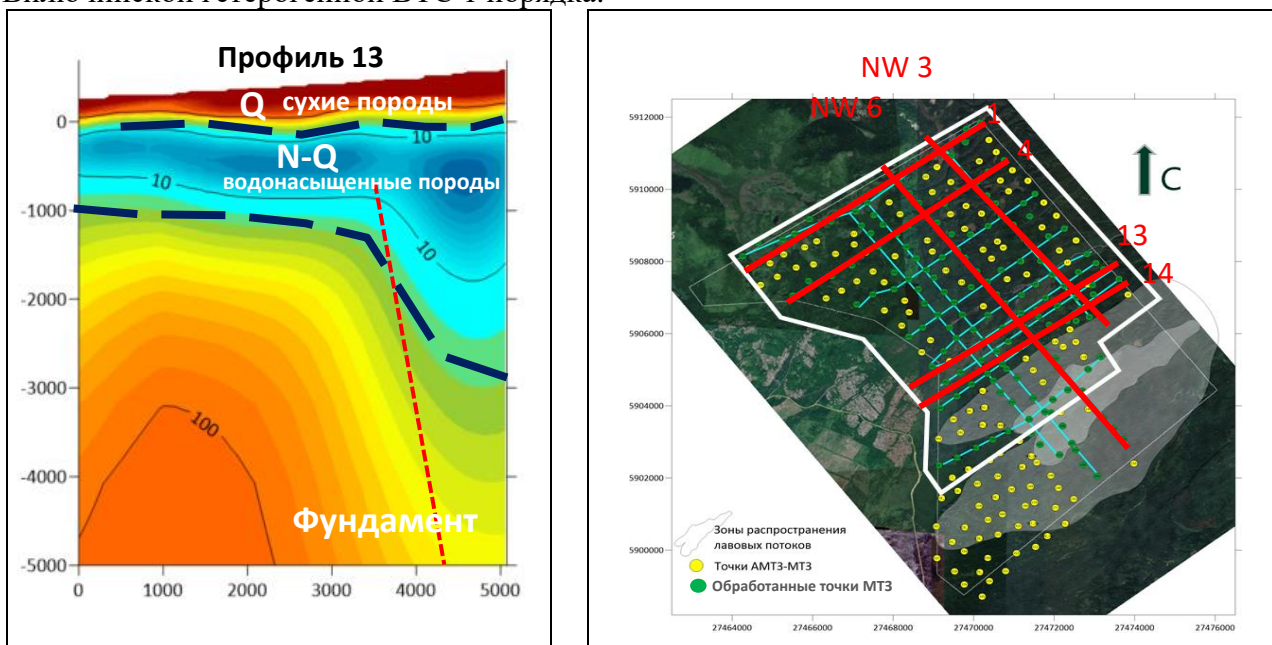


Рисунок 2 – Электрическая характеристика разреза Корякско-Кеткинского участка

В результате полевых работ в сентябре 2023 года были сняты данные с 20 сейсмостанций вдоль профиля в Жировской долине (рис. 3). Несколько станций по профилю были разграблено медведями, пострадавшие станции отработали от двух до 63 дней. Результат инверсии полученных данных представлен в виде распределения аномалий скорости поперечных волн и абсолютных скоростей. Решение получено в интервале глубин до 3 км, однако надежное восстановление достигается до глубины около 2 км.

Можно видеть, что на большей части профиля наблюдается крупное высокоскоростное тело, в котором V_s выше значений 2.2 км/с. Под ним, на глубинах ниже 1.2 км под поверхности наблюдается слой с пониженными скоростями ниже 2.25 км/с. Такая инверсия скорости может быть обусловлена наличием флюидопроводящего слоя, доставляющего воду со стороны Мутновского вулкана.

Сверху он экранирован низкопроводящим слоем, представленным в нашей модели высокоскоростной аномалией. В районе горячих источников высокоскоростной слой утоняется и становится проницаемым для воды из нижнего слоя, в результате чего выход на поверхность горячих вод происходит именно здесь.

Выводы и заключение

На данный момент по Корякско-Кеткинскому и Верхнежировскому участкам уже получены интересные с точки зрения перспектив результаты. Этих материалов недостаточно, чтобы делать полноценные выводы, но значительно добавляет интерес к изучению участков и заложению поисковых скважин. В 2024 году геологоразведочные работы продолжаются, к первым двум участкам добавился Больше-Баннный ЛУ на котором также ведется геолого-геофизическое изучение.

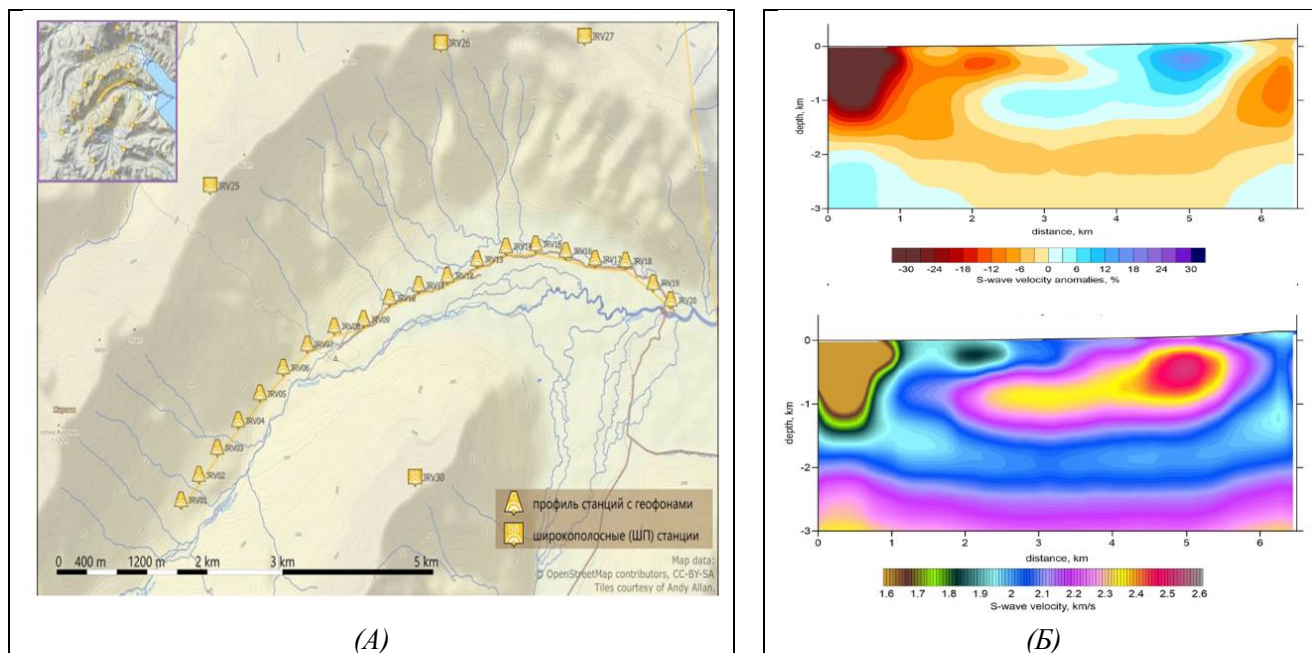


Рисунок 3 – Профиль из 20 автономных сейсмических станций в долине реки Жировой с несколькими близлежащими станциями региональной сети (А). Результат томографической инверсии по профилю вдоль Жировской долины, представленный в виде аномалий (сверху) и абсолютной скорости поперечных волн (снизу) (Б)

Список литературы

1. Нурмухамедов А.Г. Отчёт о детальных геофизических исследованиях в центральной и восточной частях участка «Дачный» Мутновского месторождения парогидротерм в 2004–2005 гг. / А.Г. Нурмухамедов. Петропавловск-Камчатский. ФГУП «Камчатгеология». 2005.
2. Шварц Я.Б. Отчет о проведении детальных геофизических работ на западных флангах Мутновского месторождения парогидротерм и работ по обобщению геофизических материалов по Мутновскому геотермальному району в 1987–1990 гг. (2-я дачная партия). / Я.Б. Шварц. Елизово. ЕГФЭ ПГО «Камчатгеология». 1990. Инв. № 5452.

УДК 620.92

Потенциал термальных вод Томской области

С.А. Янковский, С.А. Цибульский, Д.С. Крутенко, Н.С. Янковская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
Jankovsky@tpu.ru

В исследовании приводится анализ участков распространения термальных вод, пригодных для выработки электроэнергии на территории Томской области. Для исследуемой территории были выделены два перспективных водоносных горизонта: меловой, включающий в себя апт-альб-сеноманский, готерив-барремский, валанжинский водоносные комплексы, и юрский, включающий в себя васюганскую (наунакскую/тяжинскую) и тюменскую свиты.

Ключевые слова: водоносный комплекс, водоносный горизонт, температурные карты, пластовые температуры, термальные воды, притоки скважин, выработка электроэнергии, ВИЭ

Potential of thermal waters of the Tomsk region

Stanislav A. Yankovsky, Svyatoslav A. Tsibulskiy, Daniil S. Krutenko, Natalya S. Yankovskaya

Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, 634050 Tomsk, Russian Federation

The study provides an analysis of areas of distribution of thermal waters suitable for generating electricity in the Tomsk region. For the study area, two promising aquifers were identified: the Cretaceous, which includes the Aptian-Albian-Cenomanian, Hauterivian-Barremian, and Valanginian aquifer complexes, and the Jurassic, which includes the Vasyugan (Naunak/Тязгинская) and Tyumen formations.

Keywords: aquifer complex, aquifer, temperature maps, reservoir temperatures, thermal waters, well inflows, electricity generation, renewable energy sources

Для каждого водоносного комплекса по разбивкам 452 скважин построен комплект структурных и температурных карт. Расчет пластовых температур водоносных комплексов выполнялся путем решения прямой задачи геотермии с известным тепловым потоком. Анализ температурных карт дополнен данными о притоках скважин (*Мищенко, 2013*).

Для оценки возможности использования термальных вод Томской области в первую очередь необходимо выделить на территории исследования пласты-коллекторы, насыщенные водой – водоносные комплексы (*Мищенко, 2013*). Далее необходимо определить, на каких глубинах залегают эти водоносные комплексы – построить структурные карты по кровле/подошве этих водоносных горизонтов. Располагая информацией о глубинах водоносных комплексов и распределении плотности теплового потока, можно выполнить для них расчеты современных температур и выделить зоны, где температуры равны и превышают 80 °С (*Исаев, 2019*). Сопоставив эти зоны с расположением поселков территории исследования, можем сделать выводы о перспективности использования геотермальной энергии. Наиболее перспективные участки распространения термальных вод, пригодные для выработки электроэнергии: поселок Новый Васюган (отложения куломзинской свиты), поселок Наунак (отложения куломзинской и тарской свит), Нарым (отложения тарской свиты), Пудино (отложения наунакской свиты), Новоникольское (отложения васюганской и тюменской свит) и Макзыр (отложения тюменской свиты). Перспективность выделенных участков обусловлена не только существованием в разрезе высоких температур, но и получением высокодебитных притоков воды.

Работа выполнена при поддержке программы Приоритет-2030-ЭБ-016-202-2024.

Список литературы

1. *Мищенко М.В.* Термальные воды меловых отложений юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна: распространение, использование, прогнозы: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук: спец. 25.00.07. Томск, 2013. 23 с.
2. *Исаев В.И.* Тепловой поток и нефтегазоносность (полуостров Ямал, Томская область) / *В.И. Исаев, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин и др.* // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 3. С. 125–135.

РАЗДЕЛ III. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ

CHAPTER III. ACTIVE FAULTS AND SEISMICITY IN GEOFLUID SYSTEMS

УДК 550. 344.43

Сопоставление механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений вулканов Шивелуч и Ключевской

М.В. Лемзиков

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

В работе выполнено определение механизмов очагов сильных вулкано-тектонических землетрясений (ВТЗ) двух вулканов Камчатки Шивелуч и Ключевской и сопоставление полученных результатов. Исходными данными были цифровые сейсмограммы волновых форм не ниже седьмого энергетического класса с глубиной очага от нуля до 20 км. Механизмы очагов определялись по полярностям первых вступлений Р-волн с помощью разработанного пакета программ FPFIT. В результате получены различные механизмы очагов сильных ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевской, которые отражают режимы вулканической активности этих вулканов.

Ключевые слова: механизмы очагов, нодальные плоскости, сейсмические волны

Comparison of the Focal Mechanisms of the Volcano-Tectonic Earthquakes of the Volcanoes Shiveluch and Klyuchevskoy

Michail V. Lemzikov

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

The paper defines the focal mechanisms of strong volcano-tectonic earthquakes (VTEQs) of two Kamchatka volcanoes Shiveluch and Klyuchevskoy and compares the obtained results. The initial data were digital seismograms of wave forms not lower than the seventh energy class with a focal depth from zero to 20 km. Focal mechanisms were determined by the polarities of the first arrivals of P-waves using the developed FPFIT software package. As a result, various focal mechanisms of strong VTEQs of the Shiveluch and Klyuchevskoy volcanoes were obtained, which reflect the volcanic activity modes of these volcanoes.

Keywords: focal mechanisms, nodal planes, seismic waves

Введение

Самая Крупная на Камчатке Северная группа вулканов, площадь которой составляет 8500 м², расположена в Центральной Камчатской депрессии. Большая часть этой площади (около 6500 м²) занимает Ключевская группа вулканов. (Мелекесцев и др., 1991)

Шивелуч – одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки. Поперечник его основания, включая пояс аккумулятивных равнин подножий вулкана, равен 45-50 км, площадь не менее 1300 м². Абсолютная высота 3283 м (Главная вершина), высшая точка действующего аппарата (Молодой Шивелуч) около 2800 м. Это одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки. Современная постройка вулкана Шивелуч включает три главных элемента: Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный Молодой Шивелуч (Мелекесцев и др., 1991).

Ключевской вулкан – типичный стратовулкан с конусом правильной формы и абсолютной высотой 4750 м., самый высокий из действующих вулканов Европы и Азии; сложен базальтовыми лавовыми потоками и пирокластическим материалом, преобладающим

в верхней части постройки (Хренов и др., 1991). Удачное расположение Ключевской и Козыревской радиотелеметрических сейсмических сетей вблизи на конусе и вокруг Северной группы вулканов позволит определить механизмы очагов сильных ВТЗ этих вулканов.

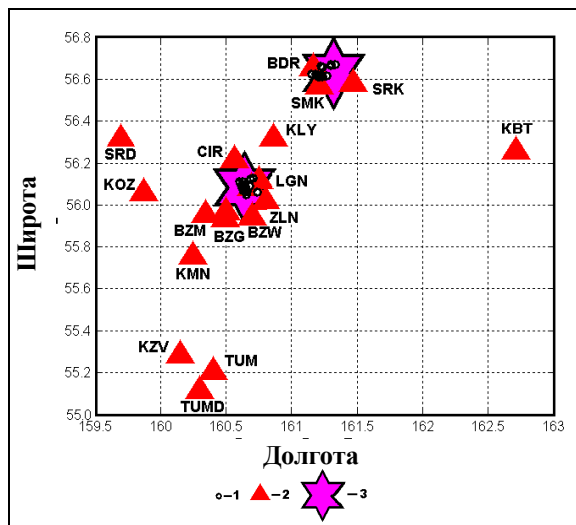


Рисунок 1 – Схема района исследования.
 1 – эпицентры сильных (ВТЗ);
 2 – радиотелеметрические сейсмические станции;
 3 – вулканы Шивелуч и Ключевской

(KLY), Безымянный (BZM), Безымянный Грива (BZG), Безымянный Запад (BZW), Срединный (SRD), Зеленая (ZLN), Киришева (KIR), Козыревск (KOZ), Каменистая (KMN), Крутоберегово (KBT), Кизимен (KZV), Тумрок (TUM), Тумрок-источники (TUMD) (рис. 1).

На всех радиотелеметрических сейсмических станциях установлен трехкомпонентный короткопериодный канал для регистрации скорости смещений грунта: один вертикальный (SHZ) и два горизонтальных (SHE, SHN).

Метод

Имеются разные методы для определения механизмов очагов землетрясений. Широко известен комплекс программ под названием FPFIT, FPLOT и др., разработанный во второй половине XX века (Введенская, 1956).

В работе использован готовый разработанный алгоритм программы FPFIT вместе с некоторыми новейшими алгоритмами (Reasenberg et. all, 1985), детализирующими и уточняющими нахождение параметров механизмов очагов землетрясений. Для такого рода событий можно применить только метод, основанный на определении полярностей первых вступлений *P*-волн.

Для определения механизма очага землетрясения необходимы: 1) полярности первых вступления *P*-волн; 2) географические координаты станций и очага; 3) эпицентральные расстояния и азимуты из очага на станции; 4) углы выхода сейсмических волн на станциях. Точность определения механизма очага зависит от количества станций. Чем больше станций, тем выше класс точности. Вычисления углов выхода сейсмических волн на станциях выполнялись с использованием скоростной модели среды (Сенюков, 2013), которая применяется на Камчатке для определения географических координат очагов землетрясений и включает слои выше уровня моря. Учет вертикальных и горизонтальных особенностей скоростной модели при конкретном положении очага землетрясения и станции выполнялся за счет разбиения среды на мелкие горизонтальные блоки с конкретными значениями скоростей сейсмических волн.

Исходные данные

В работе использовались волновые формы сейсмических сигналов сильных ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевской. Они выбирались из архива цифровых сейсмограмм (Чеброва, и др. 2020). Глубина очагов от 1 до 20 км. Энергетический класс не ниже $K_{S1,2}^{\Phi 68} \geq 7.0$ (Федотов, 1972).

Термин ВТЗ впервые был введен Г.С. Горшковым (Горшков, 1954).

Регистрация ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевского осуществляется Ключевской и Козыревской радиотелеметрическими сейсмическими сетями станций, принадлежащих КФ ФИЦ ЕГС РАН. Данные станции расположены на конусе, вблизи и в окрестностях вулканов Северной группы: Байдарная (BDR), Семкарок (SMK), Сорокина (SRK), Цирк (CIR), Логинов (LGN), Крестовский (KRS), Ключи

Механизмы очагов ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевской

В результате использования пакета программ FPFIT были получены 15 механизмов очагов ВТЗ вулкана Шивелуч (табл. 1) и 22 механизма очага ВТЗ вулкана Ключевской (табл. 2). Механизмы очагов соответствуют различным типам сдвиговых разломов: сбросам и взбросам. Механизмы очагов строились на стереографической сетке Вульфа (нижняя полусфера). Следует отметить, что не все сейсмические сигналы вулканов Шивелуч и Ключевской подходят для определения механизма очага. На некоторых волновых формах сейсмические сигналы были едва видны на фоне шума. Для определения механизма очага ВТЗ использовались только такие волновые формы, у которых сейсмические сигналы представляют четкие вступления *P*-волн на фоне шума.

Таблица 1. Механизмы очагов ВТЗ вулкана Шивелуч

№	ДАТА	TIME(UTC)	КООРДИНАТЫ ОЧАГА			К	МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ		
			φ с.ш.	λ в.д.	Н км		STR	DIP	RAKE
1	2008/04/24	07:57:40.34	56.618	161.271	3.1	7.0	213.58	54.83	-123.50
2	2009/04/03	19:10:45.03	56.673	161.334	6.6	8.1	312.94	62.02	-153.04
3	2009/05/16	09:32:03.50	56.667	161.305	5.7	7.8	59.2	64.99	-142.39
4	2011/05/31	03:14:26.07	56.612	161.236	0.9	7.0	247.13	57.62	-175.91
5	2014/10/15	02:16:20.40	56.670	161.300	1.2	8.6	29.87	63.63	-144.70
6	2023/04/29	23:19:10.10	56.657	161.240	3.0	9.4	337.47	62.06	-149.39
7	2023/04/30	01:14:15.02	56.663	161.222	2.8	9.0	204.12	68.20	171.72
8	2023/04/30	06:16:56.82	56.619	161.214	2.3	8.1	359.85	66.02	160.43
9	2023/05/01	00:32:52.07	56.615	161.202	2.9	8.2	131.96	67.60	157.23
10	2023/05/01	02:32:51.04	56.626	161.183	20.2	7.8	16.02	58.00	-143.55
11	2023/05/02	00:48:12.01	56.615	161.218	20.8	8.4	233.20	65.83	-178.56
12	2023/05/03	03:45:10.20	56.616	161.230	21.9	8.6	239.32	63.21	-163.51
13	2023/05/08	18:38:54.01	56.620	161.221	22.8	8.5	297.98	55.15	-146.89
14	2023/08/16	06:03:05.48	56.625	161.156	20.2	8.6	0.32	59.12	-159.62
15	2023/08/25	11:41:42.60	56.622	161.183	21.8	8.2	21.46	64.30	-160.63

Таблица 2. Механизмы очагов ВТЗ вулкана Ключевской

№	ДАТА	TIME(UTC)	КООРДИНАТЫ ОЧАГА			К	МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ		
			φ с.ш.	λ в.д.	Н км		STR	DIP	RAKE
1	2008/04/19	11:29:07.34	56.061	160.736	2.2	6.8	52.75	73.03	136.10
2	2008/05/08	23:39:52.03	56.051	160.655	8.5	7.0	61.67	67.42	128.79
3	2008/07/04	06:02:16.50	56.093	160.643	16.2	6.9	73.68	73.25	-108.52
4	2008/07/30	20:15:29.10	56.066	160.650	5.6	7.1	31.66	62.63	-115.23
5	2008/08/10	22:37:29.02	56.067	160.645	10.8	8.2	333.88	48.40	-134.25
6	2008/08/29	06:27:07.82	56.061	160.648	11.6	8.3	264.56	61.22	-143.27
7	2009/11/30	12:43:29.07	56.112	160.599	11.4	7.2	10.13	57.74	-166.73
8	2011/02/22	00:37:23.04	56.085	160.644	15.4	8.4	336.50	53.45	-172.26
9	2012/08/04	14:46:32.01	56.127	160.708	19.7	6.8	60.10	62.68	-153.82
10	2012/12/03	04:08:21.20	56.111	160.631	13.9	6.7	230.58	50.92	165.51
11	2012/12/06	17:32:02.01	56.072	160.629	3.8	7.1	290.22	56.84	-175.52
12	2013/02/27	19:31:58.48	56.073	160.635	5.3	6.8	84.62	55.40	176.29
13	2013/03/10	18:28:02.20	56.077	160.630	3.4	6.8	79.77	59.20	-169.64
14	2013/03/12	06:39:01.60	56.076	160.631	3.3	7.4	10.40	50.67	-178.91
15	2013/03/29	22:38:20.40	56.066	160.659	3.6	6.8	125.61	72.23	-118.23
16	2013/04/05	09:15:48.61	56.074	160.634	4.1	7.9	336.62	59.11	-150.30
17	2020/09/15	05:55:09.54	56.074	160.638	2.9	7.7	46.62	61.39	-116.64
18	2020/09/15	21:31:11.93	56.070	160.636	5.6	6.9	124.46	47.55	-107.84
19	2020/01/16	09:04:51.90	56.073	160.643	2.7	8.1	10.73	53.71	-124.68
20	2020/11/11	08:45:45.93	56.124	160.683	20.2	7.7	55.21	59.70	-135.93
21	2021/02/09	11:12:40.30	56.090	160.679	19.3	8.4	16.08	59.16	-179.45
22	2021/09/02	15:11:50.09	56.090	160.614	24.5	6.8	74.97	60.67	-140.55

Механизмы очагов ВТЗ вулкана Шивелуч отличаются от механизмов очагов ВТЗ вулкана Ключевской, в связи с различным режимом вулканической активности этих вулканов.

Механизм очага характеризуется тремя основными параметрами: а) азимут простирания главной нодальной плоскости (strike); б) угол падения плоскости (dip) и в) угол скольжения плоскости (rake). Оценки параметра (rake) определяют тип подвижка в очаге ВТЗ (сброс, взброс или сдвиг). Для выбора из двух механизмов ВТЗ наиболее вероятного, параметры механизмов очагов ВТЗ сопоставлялись с характеристиками даек, выявленными Frac-Digger методом (Kiryukhin et al, 2023).

Выводы

В работе выполнено определение механизмов очагов ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевской. Получены различные механизмы очагов, которые отражают режимы их вулканической активности.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127>.

Список литературы

1. Введенская А.В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций / А.В. Введенская // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1956. № 3. С. 34–47.
2. Горшков Г.С. Вулканическое дрожание, связанное с прорывом кратера Былинкиной / Г.С. Горшков // Бюллетень вулканологической станции М.: Академия наук СССР. 1954. № 23. С. 33–37.
3. Мелекесцев И.В. Вулкан Шивелуч / И.В. Мелекесцев, О.Н. Вольнец, В.А. Ермаков и др. // Действующие вулканы Камчатки: В 2-х т. Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука. 1991. Т1. С.84-97.
4. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке / С.Л. Сеньюков // Lap Lambert Academic Publishing. 2013. 144 с.
5. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд / С.А. Федотов // М.: Наука. 1972. 116 с.
6. Хренов А.П. Вулкан Ключевской / А.П. Хренов, В.Н. Двигало, И.Т. Курсанов и др. // Действующие вулканы Камчатки: В 2-х т. Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука. 1991. Т1 С. 106-145.
7. Чеброва А.Ю. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции / А.Ю. Чеброва, А.С. Чемарёв, Е.А. Матвеевкоу др. // Геофизические исследования. 2020. том 21. № 3. С. 66–91. DOI: <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
8. Reasenber P. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions / P. Reasenber, D. Oppenheimer // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1985. № 85–739. 109 p.
9. Kiryukhin A.V. Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano triggering eruptions of Bezymianny volcano based on seismological and petrological data / A.V. Kiryukhin, O.V. Bergal-Kuvikas, M.V. Lemzikov // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 442. P. 107892. – DOI 10.1016/j.jvolgeores.2023.107892.
10. Kiryukhin A.V. Magmatic system of the Klyuchevskoy volcano according to seismic data and their geomechanical interpretation / A.V. Kiryukhin, O.V. Bergal-Kuvikas, M.V. Lemzikov, N.B. Zhuravlev / Journal of Mining Institute. 2023. Vol. 263. 698-714 p.

О закономерностях изменения параметров сейсмического процесса, отражающих флюидогеодинамические условия заключительной стадии подготовки очагов сильнейших Тихоокеанских землетрясений

А.В. Соломатин

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

В работе предлагается обобщение и флюидогеодинамическая интерпретация вариаций ряда базовых параметров сейсмического процесса на заключительной стадии подготовки сильнейших Тихоокеанских землетрясений. Важными отличиями предлагаемого подхода от апробированного в методе долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) академика С.А. Федотова представления об обобщенном сейсмическом цикле развития очагов сильнейших землетрясений являются, с одной стороны, представление о спектре величин исследуемых параметров, заданном в виде нечеткой Р-шкалы, а с другой - использование при исследовании их вариаций концепции определенности.

Ключевые слова: сейсмический прогноз, сейсмический мониторинг, спектр сейсмического процесса, геодинамика, гидродинамика, теория возможностей, концепция уверенности

On the Regularities of Changes in Seismic Process Parameters Reflecting Fluid and Geodynamic Conditions of the Final Stage of Preparation of the Sources of the Strongest Pacific Earthquakes

Alexey V. Solomatin

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

The paper proposes a generalisation and fluid-geodynamic interpretation of variations in a number of basic parameters of the seismic process at the final stage of preparation of the strongest Pacific earthquakes. The important differences of the proposed approach from the concept of the generalised seismic cycle of the strongest earthquake sources development approved in the method of long-term seismic forecast of the (LTSF) of academician S.A. Fedotov are, on the one hand, the representation of the spectrum of parameters under study given in the form of a fuzzy P-scale, and, on the other hand, the use of the concept of certainty in the study of their variations.

Keywords: seismic forecast, seismic monitoring, seismic process spectrum, geodynamics, hydrodynamics, possibility theory, certainty concept

Введение

Сейсмичность в самом широком диапазоне масштабов является одним из проявлений процессов близкой к критическому состоянию сейсмоактивной геосреды. В ней отражаются как собственная активность геосреды, так и ее активные отклики на внешние воздействия. Все это определяет существенную сложность изучения развития очагов землетрясений, в том числе, наиболее опасных из них – сильнейших.

Преыдушие работы автора показали важность использования при описании свойств сейсмического процесса нечетких оценок – Р-параметров последнего и концепции определенности временных вариаций их спектров (D-представление таких параметров). Важность этого направления исследований основывается на предположении связи указанных спектров с динамическими и флюидными процессами в сейсмоактивной геосреде.

Отметим, что хотя в преыдуших работах основное внимание вполне закономерно уделялось крайним – экстремальным диапазонам таких спектров, несомненна важность исследования выраженности в сейсмическом процессе также неэкстремальных участков их диапазонов, в частности, на основе предлагаемого обобщения формулы Шеннона: $-P^a \cdot \text{Lg}(P)$

или $-(1 - P)^\alpha \cdot \text{Lg}(1 - P)$, где параметр α используется для корректировки формы фильтра, вырезающего определенный диапазон значений спектра.

Также в работе используется предположение о выраженности определенных энергетических уровней сейсмического процесса (Садовский, 2004). Как показывает опыт, один из этих уровней характеризуется значением в шкале обобщенного энергетического класса Федотова (Соломатин, 2022) $K^F = 11$.

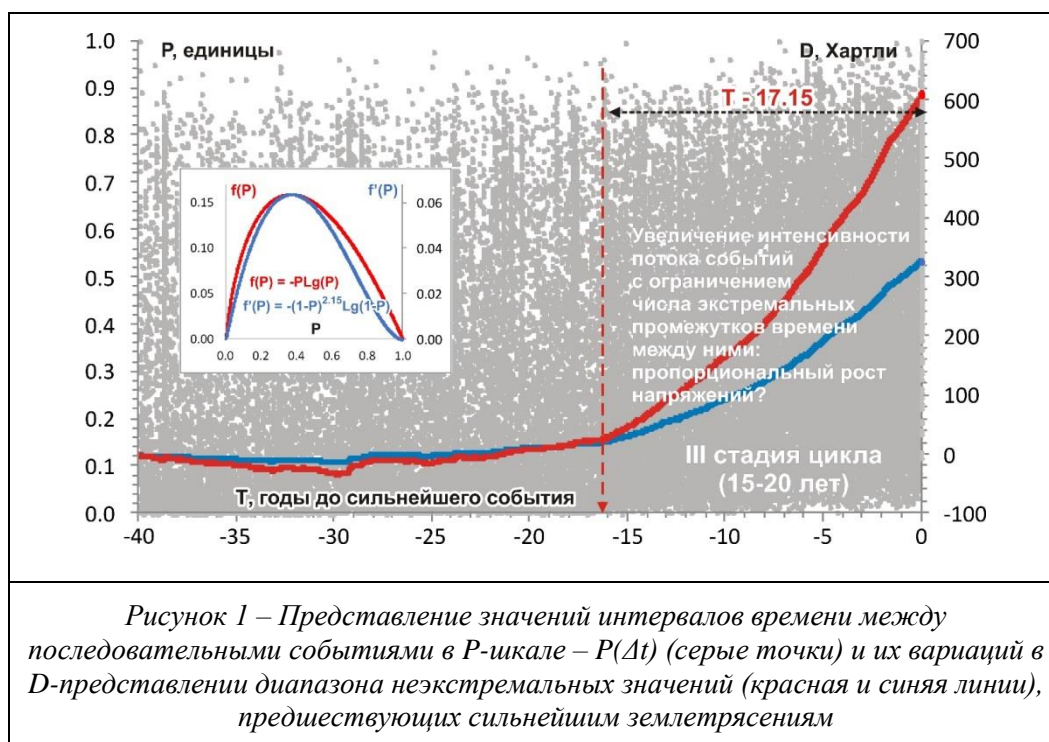
Для представления о полезности предлагаемого подхода результаты его применения сравниваются с обобщенным для всего Тихоокеанского региона временным ходом значений наклона графика повторяемости, характерным для подготовки сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги и прилегающих регионов (Соломатин, 2021). Такое сравнение необходимо не только в теоретическом, но и в практическом планах, так как именно на основе последних была отмечена максимальная выраженность двухстадийного характера завершающей фазы подготовки сильнейших землетрясений (Соломатин, 2021), что исключительно важно для мониторинга и прогноза развития следующих таких землетрясений в Тихоокеанском регионе.

Исходные данные наблюдений и их подготовка

В работе использовались данные каталога землетрясений ISC для района Тихого океана и Юго-Восточной Азии с $M = 4$ и выше за период 1964–2024 гг. Всего было отобрано около 900 тысяч событий, в том числе 128 тысяч – в очагах 34-х сильнейших землетрясений, из исследованных ранее в (Соломатин, 2021). В качестве основной была выбрана магнитуда mb , известная для порядка 90% всех событий. Для приведения величин остальных событий к этой шкале mb было построено более 30-ти соотношений. Для получения однородности данных итоговые унифицированные оценки величин землетрясений были независимо пересчитаны согласно (Соломатин, 2021) в пределах каждого из очагов в шкалу K^F .

Результаты построения D-представлений вариаций сейсмических параметров

На рисунках 1–3 приведены D-представления вариаций интервалов времени между последовательными событиями в очагах сильнейших землетрясений на завершающей стадии развития последних, соответственно: интенсивности сейсмического процесса в шкале $P(\Delta t)$; его активности в условной P-шкале в виде $P(K, \Delta t) = 1 - ((1 - P(K)) \cdot (1 - P(\Delta t)))^{0.3}$; а также его энергетического спектра в шкале $P(K)$.



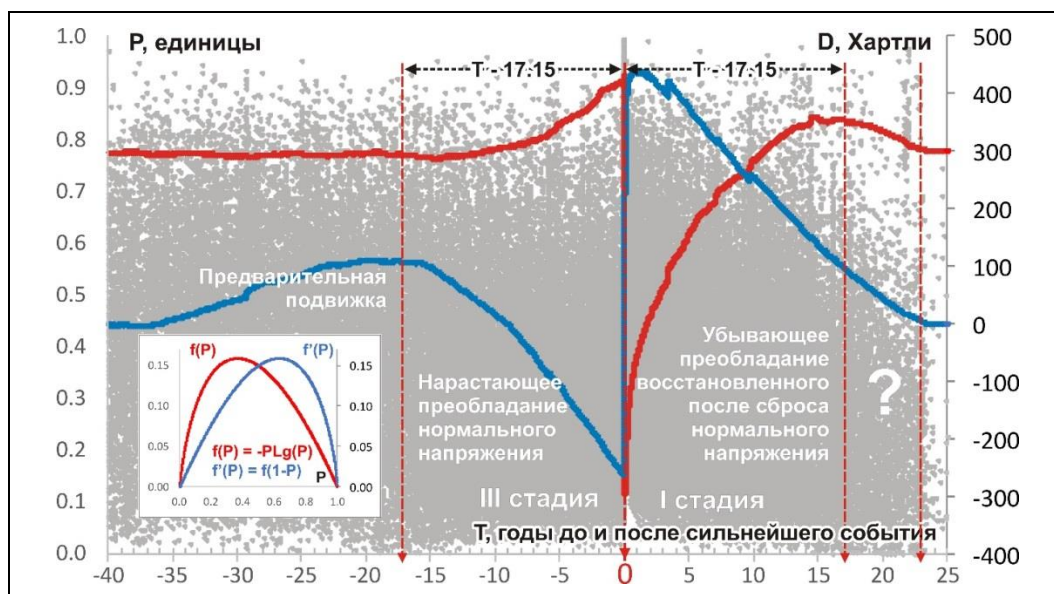


Рисунок 2 – Представление активности сейсмического процесса в условной P-шкале: $P(K, \Delta t) = 1 - ((1 - P(K)) \cdot (1 - P(\Delta t)))^{0.3}$ (серые точки) и их вариаций в D-представлении двух диапазонов неэкстремальных значений (красная и синяя линии), предшествующих сильнейшим землетрясениям

Из рис. 1 и 2 очевидно значимое увеличение интенсивности сейсмического процесса на III стадии сейсмического цикла, а также общее смещение энергетического уровня сейсмического процесса в сторону более сильных событий перед III – заключительной стадией сейсмического цикла с последующим обратным смещением в сторону более слабых.

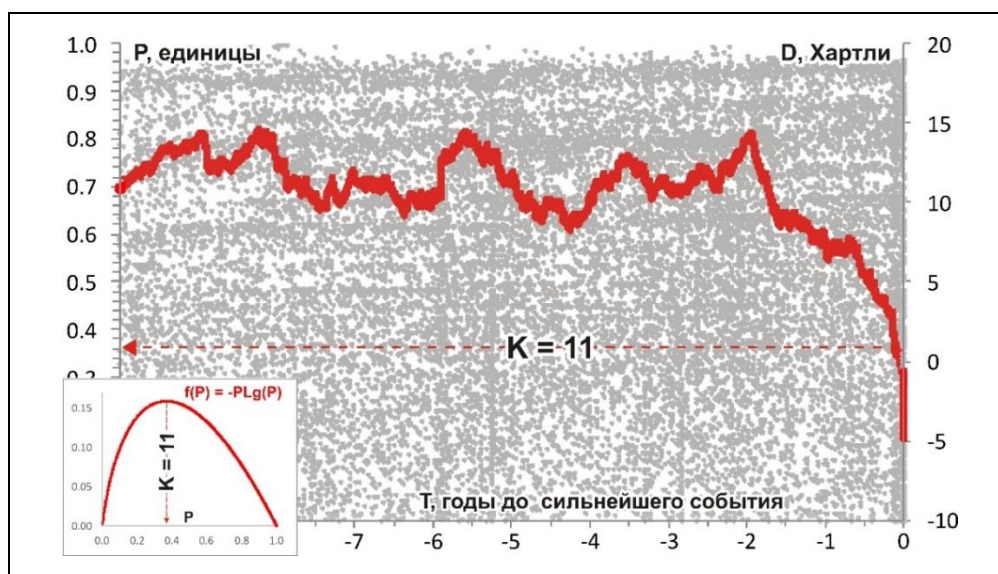


Рисунок 3 – Представление энергетического спектра сейсмического процесса в P-шкале (серые точки) и вариаций D-определенности диапазона неэкстремальных значений (красные точки), предшествующих сильнейшим землетрясениям

Оценки соответствующих значений спектра в P-шкале в виде серых точек приведены на рис. 1–3 для представления об эффективности используемых D-представлений вариаций последнего. При этом рис. 3 показывает максимальную из приведенных выше эффективность фильтра неэкстремальных значений $-P \cdot Lg(P)$ в случае совмещения максимума указанной функции ($P \approx 0.37$) с энергетическим уровнем $K^F \approx 11$. Это, возможно, указывает на особую роль таких событий в динамических (и флюидных?) процессах подготовки очагов сильнейших землетрясений.

Чтобы показать неслучайность предельно детальных (совсем не характерных для кумулятивных представлений, см. рис. 1 и 2) вариаций использованного D-представления энергетического спектра сейсмического процесса на заключительной стадии подготовки сильнейших Тихоокеанских землетрясений они были совмещены на рис. 4 с вариациями наклона графика повторяемости на заключительной стадии развития землетрясений Курило-Камчатской дуги и прилегающих регионов (Соломатин, 2021).

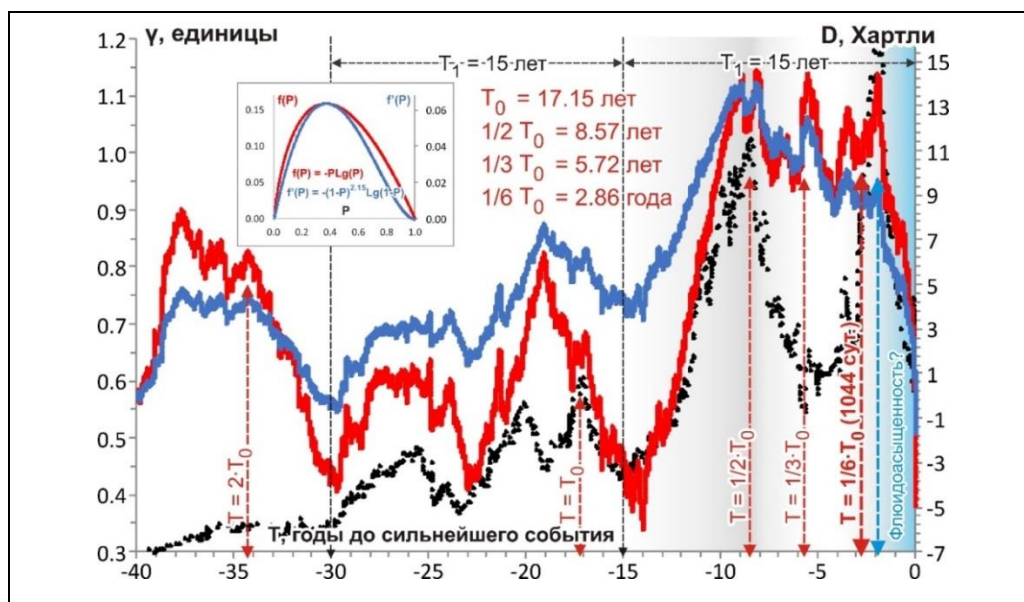


Рисунок 4 – Сопоставление D-представлений хода сейсмического процесса на заключительной стадии развития очагов сильнейших Тихоокеанских землетрясений на уровне $K^F = 11$ (использованы фильтры: $f(P) = -P \cdot Lg(P)$ – красные и $f'(P) = -(1 - P)^{2.15} \cdot Lg(1 - P)$ – синие точки) с вариациями наклона графика повторяемости для этой стадии из (Соломатин, 2021) – черные точки

Отмечено существенное совпадение указанных графиков.

Выводы

Хотя динамические условия подготовки сильнейших землетрясений вполне удовлетворительно характеризуются традиционными пространственными, временными и энергетическими характеристиками сейсмического процесса, наиболее полное их отражение, по-видимому, наблюдается во временном и энергетическом спектрах последнего.

Важным результатом представленной работы является подтверждение связи геодинамических и флюидных условий в сейсмоактивной среде и характера соответствующего им сейсмического процесса на новом уровне – уровне неэкстремальных значений параметров последнего. Кроме того, результаты настоящей работы, полученные в работе более надежным, чем оценки наклона графика повторяемости способом, указывают на выраженность периодов $T = 15$ и 17.15 лет и гармоник последнего в сейсмическом процессе всего Тихоокеанского региона, что исключительно важно для построения сейсмических прогнозов.

Список литературы

1. Садовский М.А. Геофизика и физика взрыва. / М.А. Садовский // М.: Наука. 2004. С. 307–384.
2. Соломатин А.В. Энергетический спектр сейсмического процесса в приложении к долгосрочному сейсмическому прогнозу и среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности / А.В. Соломатин // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 67–79.
3. Соломатин А.В. Энергетические свойства сейсмического процесса и возможность введения обобщенного энергетического класса землетрясений / А.В. Соломатин // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 80–92.

РАЗДЕЛ IV. МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

CHAPTER IV. MAGMATIC SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

УДК 550.4

Моделирование и мониторинг геотермальных процессов в конусе Авачинского вулкана

Е.В. Черных, А.В. Кирюхин, О.О. Усачева, А.В. Сергеева

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

Активные вулканы в период извержения опасны своей магмо-гидротермальной деятельностью, сопровождающейся гидротермальными взрывами, извержением магмы, образованием селей и другими сопутствующими последствиями. Кратер Авачинского вулкана с 1991 г. заполнен застывшей лавой и целью работы является оценить тепловой эффект внедрения магмы в конус вулкана для прогноза предельного возрастания давления под пробкой с применением термогидродинамического TOUGH2- моделирования.

Ключевые слова: гидротермальный взрыв, термогидродинамическое моделирование, TOUGH2

Modelling and Monitoring of Geothermal Processes in the Cone of the Avachinsky Volcano

Evgenya V. Chernykh, Alexey V. Kiryukhin, Olga O. Usacheva, Anastasia V. Sergeeva

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

Active volcanoes during the eruptive period are dangerous because of their magma-hydrothermal activity. This is accompanied by hydrothermal explosions, magma collapse, mudflows and other related consequences. The crater of Avachinsky volcano has been filled with solidified lava since 1991, and the aim of this work is to estimate the thermal effect of magma intrusion into the volcanic cone in order to predict the ultimate pressure rise under the plug using TOUGH2 thermohydrodynamic modelling.

Keywords: hydrothermal explosion, thermohydrodynamic modelling, TOUGH2

Введение

Целью данной работы является анализ и мониторинг термогидродинамических моделей прогноза давления пара под лавовой пробкой Авачинского вулкана, при котором возможно ее разрушение в результате гидротермального взрыва.

Гидротермальный взрыв (магмо-фреатическое, фреатическое извержения) – это процесс разрушения верхнего водоупора (например, лавовая пробка) при нарастании давления пара на его подошве выше предельной величины горного давления. Одной из причин гидротермального взрыва может быть контакт магмы с водой с последующим ее переходом из жидкой фазы в пар.

Примеры гидротермальных извержений описаны в следующих публикациях (*Browne et al., 2001, Eichelberger et al., 2020, Kiryukhin et al., 2012, Kiryukhin et al., 2023, Oikawa et al., 2016, Uchida 2023*). Фреатическое извержение вулкана Онтакэ (Япония), произошло в сентябре 2014 г. спустя несколько месяцев после магматической активизации вулкана. Извержение было внезапным и неожиданным, началось с сухих пирокластических потоков, с последующим камнепадом, выпадением дождя с тефрой и истечением мутной горячей воды из кратера. В результате число жертв составило 64 человека. На вулкане Уайт-Айленд (Новая Зеландия) в декабре 2019 г. в результате фреатического извержения пострадало 47

человек. Оползень и сель, произошедшие в Долине гейзеров в 2007 и 2014 гг., и обвал в кратере Мутновского вулкана в сентябре 2021 г. по счастливой случайности обошлись без человеческих жертв.

Авачинский вулкан высотой 2771 м находится в непосредственной близости к областному центру Камчатского края и представляет угрозу в случае такого извержения.

Активность и геологическое строение конуса Авачинского вулкана

Молодой конус Авачинского вулкана начал формироваться 3800 лет тому назад (*Мелекесцев и др., 1993*), он сложен лавовыми потоками андезитов и базальтов, а также шлаковым материалом.

За период наблюдений с 1739 г. известно и документально подтверждено, что 2 раза происходило заполнение кратера лавой с последующим ее застыванием и в дальнейшем происходило извержение и разрушение лавовой пробки (*Пуйн, 1946*).

Пароксизмальное извержение 1926–1927 гг. было одним из сильнейших в историческое время по объему изверженных продуктов. Главная роль принадлежала пирокластике, лавы занимали подчиненное положение. После извержения был сформирован кратер вулкана близкий к современным размерам (*Пуйн, 1946*).

В 1991 г. снова произошло умеренное эффузивное извержение, в результате которого в кратере вулкана образовалась мощная лавовая пробка объемом $8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, существующая по настоящее время.

В 2001 г. в результате слабой газовой эксплозии в лавовой пробке возникла трещина СЗ-ЮВ направления.

Мониторинг активности вулкана

За Авачинским вулканом с 2000 г. ведутся непрерывные сейсмические наблюдения Камчатским филиалом Геофизической службы РАН, проводятся режимные наблюдения за температурой и составом фумарольных газов в кратере, деформациями конуса по данным GNSS.

С.А. Федотовым был предложен метод оценки тепловой мощности по высоте парогазовых струй фумарол вулкана (*Федотов, 1982*), но из-за погодных ограничений по этому методу получены лишь редкие дискретные оценки: 60 МВт (1981 г., 4 замера) и 29 МВт (2023 г., 3 замера).

По данным газогидрохимического опробования Западной фумаролы с принудительным отбором неконденсирующихся газов и конденсата (*патент RU 0195671 U1, Поляков, Кирюхин, 2019*), состав неконденсирующихся газов – азотно-углекислый с метаном и температурой на выходе от 91 до 166 °С (табл. 1). По данным опробования в вакуумированные ампулы Гиггенбаха с поглощением кислых газов Восточной и Западной фумарол, общий газовый состав включает также существенную долю SO₂ и H₂S, температура на глубине 1.5 м составляет от 570 до 626 °С (табл. 2, (*Малик и др., 2017*)). По изотопному составу вода имеет смешанное метеорно-седиментационно-магматическое происхождение, при этом CO₂ – магматического происхождения (*Кирюхин, 2020, Kiryukhin et al, 2017*).

Таблица 1. Газовый (об.%) и изотопный состав неконденсирующихся газов из фумаролы на западной кромке кратера Авачинского вулкана по данным опробования 2014–2018 гг. (Кирюхин, 2020)

Дата	T °С	H ₂	Ar	O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	R л/кг	δ ¹³ C(CO ₂)
10.08.2014	166	0.686	2.4	0.3	3.4	92.0	0.45		-6.8
07.08.2015	94	0.400	0.4	6.4	27.4	64.5	0.06		-
06.08.2016	94	0.310	0.5	4.5	17.6	76.1	0.03		-10.1
03.08.2017	91	0.011	-	17.3	69.5	12.6	0.01		-
28.07.2018	93	0.044	0.8	18.8	70.2	10.0	0.10		-8.3
28.07.2024*	361/1.2 м	19.4	0.029	4.6	21.4	54.5	0.01	8	

*проба 28.07.2024 отобрана Н.Б. Журавлевым и Л. Позолотиной. Все газовые анализы выполнены в АЦ ИВиС ДВО РАН, изотопный анализ δ¹³C (CO₂) выполнялся в ГИН РАН, R- отношение газ/вода (л/кг).

К вторичному химическому разогреву фумарол может приводить сгорание ряда газов, таких как водород, метан, сероводород, возможно горение серы. В последней пробе за 2024 г. (табл. 1) определена газовая смесь с высоким содержанием водорода, который хорошо горит. Таким образом, возможно окисление/сгорание водорода и другие реакции горения, вызывающие разогрев фумарольных выходов: (1) $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ (сгорание водорода, наиболее вероятно); (2) $\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (метана мало, менее вероятно); (3) $2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$ (сгорание сероводорода).

Результаты опробования вулканических газов в фумаролах кратера Авачинского вулкана показывают, что в газовой фазе низкотемпературных фумарол доминируют N_2 и CO_2 .

Таблица 2. Химический состав газов фумаролы вулкана Авачинский на восточном поле по данным опробования 2013–2016 гг. (с удалением атмосферной компоненты), ммоль/моль (Малик и др., 2017)

Дата	T °C	H ₂ O	CO ₂	H ₂ S	SO ₂	HCl	CH ₄	H ₂	N ₂	Ar
18.08.2013	610	898	75.4	4.1	17.3	2.1	0.0005	1.47	0.85	0.012
28.09.2013	626	899	74.1	4.6	17.6	1.8	0.00019	1.66	0.51	0.02
18.07.2014	595	975	15.1	3.0	3.5	0.96	0.010	1.73	0.21	0.00072
17.08.2014	605	963	16.4	5.4	10.8	1.76	0.013	1.92	0.24	0.00077
20.10.2014	570	976	11.3	2.11	5.9	2.15	0.009	2.40	0.174	
16.09.2015	584	985	5.13	1.42	5.11	1.63	0.0088	1.47	0.094	0.00084
28.04.2016	590	978	6.30	2.47	9.3	2.24	0.007	1.62	0.18	0.00080

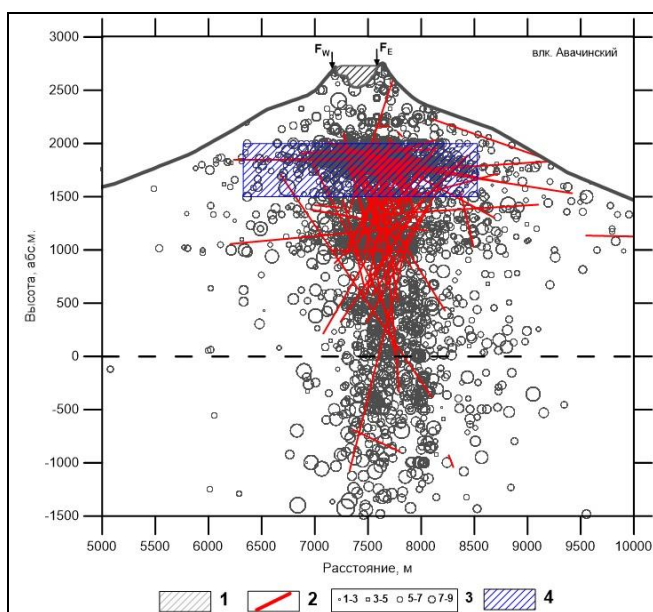


Рисунок 1 – Вертикальный разрез постройки Авачинского вулкана в направлении СЗ-ЮВ
F_w – западная фумарола,
F_e – восточная фумарола; красные линии – дайки и силлы,
 1 – лавовая пробка в конусе,
 2 – проекции внедрения даек и силлов в плоскости разреза, определенные Frac-Digger методом ($\delta_r = 1$ сут.; $\delta_z = 6$ км; $\delta_z = 200$ м; $N \geq 6$) (Кирюхин, 2020).
 3 – эпицентры землетрясений с 2000 г. по 08.2024 г. показаны кружками (пропорционально энергетическому классу K_S от 1.1 до 8.5)
 4 – контуры модели,
F_w – западная фумарола, *F_e* – восточная фумарола

Магматическая активность Авачинского вулкана за период с 2000 по август 2024 г. оценивается методом Frac-Digger (Кирюхин, 2020) и за это время выявлено 72 дайки и 14 силлов, в диапазоне отметок от 1500 до 2000 м. абс., большая часть которых внедряется под конусом Авачинского вулкана (рис. 1)

Термогидродинамическое моделирование

Для исследования термогидродинамических условий в конусе Авачинского вулкана была использована программа TOUGH2 с модулями состояния флюидов EOS1, EOS2 и EOS3.

EOS1 – предназначен для описания двухфазного состояния однокомпонентного флюида H_2O , EOS2 – для описания двухфазного двухкомпонентного ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) флюида, EOS3 – для описания двухфазного двухкомпонентного ($\text{H}_2\text{O} + \text{Air}(\text{N}_2)$) флюида. Для визуализации результатов моделирования использовалось ПО PetraSim 5.2.

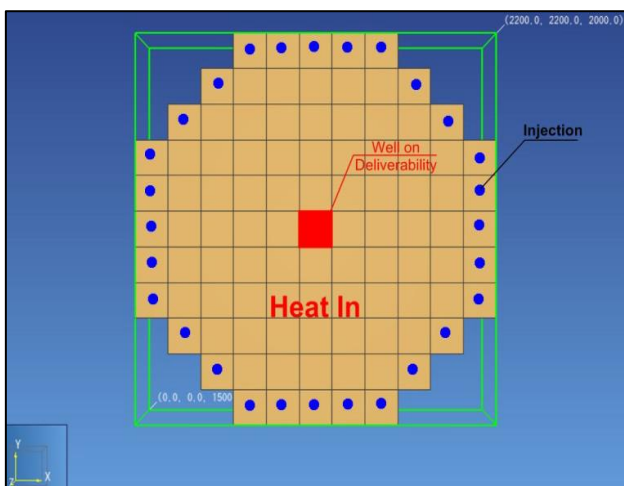


Рисунок 2 – Геометрии области моделирования и условия водного и теплового питания

Геометрия модели определена для описания процессов в основании конуса в диапазоне от 1500 до 2000 м абс., размеры модели в плане 2.2×2.2 км. Вычислительная сетка 2D со следующими параметрами разбиения: $\Delta X = 200$ м ($NX = 11$) $\Delta Y = 200$ м ($NY = 11$), общее количество элементов модели – 121. Высота модели $\Delta Z = 500$ м ($NZ = 1$) (рис. 2).

Фильтрационно-емкостные свойства определены следующим образом:
 Плотность горных пород – 2600 кг/м³,
 Пористость – 0.1,
 Проницаемость – 10^{-13} м².

Начальные условия: температура $T = 10$ °С, газонасыщение $S_g = 0.5$ (EOS1), давление $P = 1$ бар, время моделирования – 100 лет.

По периферии модели задан приток метеорных вод с расходом 1.8 кг/с и температурой 10 °С в каждой ячейке домена INF (46.8 кг/с). В ячейках Heat IN внутри модели заданы источники тепла (связанные с магматической деятельностью вулкана) – 5 МВт (суммарно 340 МВт) и неконденсирующегося газа 0.05 кг/с (CO₂ или N₂).

Разгрузка определена в центре модели в режиме разгрузки из скважины (well on deliverability) с параметрами $P_I = 1 \times 10^{-10}$ м³, $P_b = 1$ бар, как объединенная разгрузка двух fumarol (Восточной и Западной).

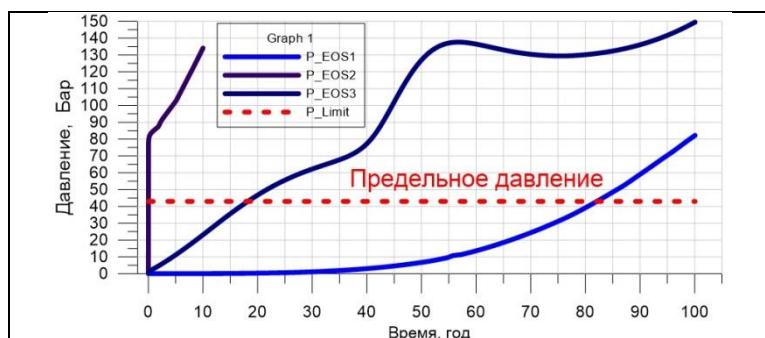


Рисунок 3 – Результаты моделирования по давлению для модулей состояния флюидов EOS1, EOS2 и EOS3

Полученная в результате моделирования (100 лет) прогнозная температура на подошве лавовой пробки в центральной части конуса Авачинского вулкана оценивается для варианта моделирования с EOS2 (H₂O + CO₂) до 326 °С, давлением до 151 бар (рис. 3), насыщение газовой фазы до 0.44. При указанном выше давлении существует возможность разрушения верхнего относительного водоупора (лавовой пробки) при ее мощности менее 170 м.

Выводы

1. Результаты моделирования показывают возможность гидротермального взрыва с разрушением лавовой пробки конуса Авачинского вулкана в течение до 82 лет при заданных на модели условиях теплового, водного и газового питания.

2. Источники теплового и водного питания, заданные на рассматриваемой модели, определены как постоянные величины, значения которых нуждаются в более глубоком обосновании. Кроме того, водное питание имеет сезонный характер, а тепловое зависит от режима магматической деятельности. Присутствие неконденсирующихся газов (CO₂, N₂, CH₄) может значительно ускорить процесс разрушения лавовой пробки. При этом увеличение доли газа может сопровождаться понижением температуры на режимных fumarolax.

3. Применяемый инструмент TOUGH2-моделирования может быть значительно усовершенствован и приближен к условиям модельного объекта. В связи с этим, задачами дальнейших исследований являются: (1) 3D геометризация конуса Авачинского вулкана в

диапазоне отметок выше 1500 м абс. с распределенной разгрузки фумарол; (2) Применение модулей состояния флюидов EOS2 (с учетом CO₂), EOS3 (с учетом N₂), EOS1-sc (расширение диапазона модельных температур до 2000 °C); (3) Для калибровки модели и оценки чувствительности оцениваемых параметров к исходным данным будут применены методы инверсионного iTOUGH2 моделирования с использованием в качестве исходных данных значений тепловой разгрузки (фумаролы) и притока/аккумуляции магмы в конусе Авачинского вулкана по сейсмоданным.

Работа выполнена с использованием данных, 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/>).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопроводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127/>.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А.В. Кирюхин* // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431с.
2. *Малик Н.А.* Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013-2016 гг. / *Н.А. Малик, М.Е. Зеленский, В.М. Округин* // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2017. № 1. Выпуск 33. С. 21–32.
3. *Мелекесцев И.В.* Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. I (1737-1909 гг.) / *И.В. Мелекесцев, О.А. Брайцева, В.Н. Двигало, Л.И. Базанова* // Вулканология и сейсмология, 1993. № 6. С. 13–27.
4. *Мелекесцев И.В.* Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. II (1926-1991 гг.) / *И.В. Мелекесцев, О.А. Брайцева, В.Н. Двигало, Л.И. Базанова* // Вулканология и сейсмология, 1994. № 2. С. 3–23.
5. *Пийп Б.И.* О раскаленных аггломератовых потоках Авачи и о типе извержений этого вулкана / *Б.И. Пийп* // Бюллетень вулканологической станции на Камчатке, 1946. №12. С. 18–28.
6. *Поляков А.Ю.* Устройство для отбора конденсата воды из фумарол: патент № 0195671 (RU 0195671 U1) / *А.Ю. Поляков, А.В. Кирюхин*; заявитель и патентообладатель. — № 2019115698; заявл. 2019.05.21; опубл. 2020.02.03.
7. *Федотов С.А.* Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков / *С.А. Федотов* // Вулканология и сейсмология, 1982. № 2. С. 3–28.
8. *Browne P.R.L., Lawless J.V.* Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere // *Earth-Science Reviews* 52, 2001. P. 299–331.
9. *Eichelberger J.* Exploring and Modeling the Magma–Hydrothermal Regime / *John Eichelberger, Alexey Kiryukhin, Silvio Mollo et al* // *Geosciences*, 2020, 10, doi:10.3390/geosciences10060234.
10. *Kiryukhin A.* Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) / *A. Kiryukhin, V. Lavrushin, P. Kiryukhin, P. Voronin* // *Geofluids*. 2017. V. 2017. Art. 4279652.
11. *Teruki Oikawa* Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews / *Teruki Oikawa, Mitsuhiro Yoshimoto, Setsuya Nakada et al.* // *Earth, Planets and Space*. 2016. 68:79 DOI: 10.1186/s40623-016-0458-5.

Кинетика вымывания растворимых солей из пепла вулкана Шивелуч, апрельское извержение 2023 года

М.А. Назарова, А.В. Сергеева, А.А. Кузьмина, Е.В. Карташева, Д.О. Мартыненко

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
anastavalers@gmail.com*

В результате пароксизмального эксплозивного извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 года, на дневную поверхность поступили большие объемы вулканического пепла, и близко расположенные к вулкану поселки оказались покрыты толстым слоем вулканического материала, вместе с которым на поверхность поступили растворимые соли. Для выяснения влияния пепла на качество питьевых вод поселков, оказавшихся в зоне пеплопада, были отобраны пробы пепла, исследован их состав, состав растворимой части. Для выяснения вопроса о длительности воздействия растворимых веществ пепла на водные ресурсы поселков были выполнены эксперименты по кинетике вымывания солей из него. Обнаружено немонотонное, но довольно быстрое промывание пепла, а в природе пиковые концентрации растворимых солей достигались в течение нескольких дней. В естественных условиях, толща пепла, промываемая метеорными водами, за весенне-летний сезон потеряла до 90% растворимых солей, и влияние пепла на водные ресурсы поселков снизилось.

Ключевые слова: Шивелуч, извержение вулкана, вулканический пепел, Камчатка, сульфаты, хлориды, водные ресурсы

Kinetics of soluble salt leaching from the ash of Shiveluch volcano, April 2023 eruption

Maria A. Nazarova, Anastasia V. Sergeeva, Anna A. Kuzmina, Elena V. Kartasheva, Darina O. Martynenko

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

As a result of the paroxysmal explosive eruption of Shiveluch volcano in April 2023, large volumes of volcanic ash were deposited on the day surface, and the settlements close to the volcano were covered with a thick layer of volcanic material, along with which soluble salts were deposited on the surface. To clarify the influence of ash on the quality of drinking water in the settlements located in the ashfall zone, ash samples were taken, their composition and soluble part composition were investigated. Experiments on the kinetics of salt leaching from ash were carried out to clarify the issue of duration of ash soluble substances impact on water resources of settlements. Non-monotonic, but rather fast washing of ash was found, and in nature peak concentrations of soluble salts were reached within several days. Under natural conditions, the ash column washed by meteoric waters lost up to 90% of soluble salts during the spring-summer season, and the influence of ash on water resources of settlements decreased. The paper discusses the influence of conditions on the input of soluble salts from ash.

Keywords: Shiveluch, volcanic eruption, volcanic ash, Kamchatka, sulfates, chlorides, water resources

Введение

Вулкан Шивелуч, расположенный в северной части Центрально-Камчатской впадины, является одним из самых активных на полуострове. В апреле 2023 г. на вулкане Шивелуч произошло пароксизмальное эксплозивное извержение, с сильными выбросами пепла (Гирина и др., 2023), в зону пеплопада попали некоторые населенные пункты, интенсивный пеплопад был в поселках Ключи, Козыревск, Майское, где суммарно проживает порядка 5600 человек.

Вместе с пеплом, при извержениях на поверхность поступают различные соединения, в том числе тех элементов, содержание которых нормируется для потребителя, например, мышьяк, медь, цинк, кадмий, ртуть, свинец, стронций, барий и др. Выпадающие пеплы

приводят к повышению содержания в водоемах хлоридов, фторидов, ряда микроэлементов, в том числе тяжелых металлов и других токсичных примесей.

Ранее было выяснено, что в течение сезона, с апреля по август, пепел вулкана Шивелуч на 90% промывается метеорными водами – дождями и тальми водами, и его влияние на водозаборы населенных пунктов носит кратковременный характер (*Sergeeva et al., 2024*). Токсичные примеси, поступившие с пеплом, также уносятся с водами и в зависимости от своей химической природы соосаждаются в той или иной форме.

Пепел, выпавший на грунт, постепенно промывается дождевыми и тальми водами, а пепел, который попал в водоемы, находится в контакте с водой непрерывно. Поэтому в настоящей работе исследована кинетика промывания пепла, как в непрерывном режиме, так и в дискретном/порционном. Целью работы было установить скорость, с которой из пепла будут вымыты растворимые соли, под влиянием естественных погодных условий (*Sergeeva et al., 2024*).

Материалы и методы

Образцы пепла отобраны в окрестностях поселка Ключи непосредственно во время извержения в апреле 2023 года. Водные вытяжки свежего пепла были получены путем смешения 100.0 г пепла с 1.0 л воды, после чего взвесь размешивали на магнитной мешалке, отстаивали, фильтровали. Полученная вытяжка была использована для определения макро- и микроэлементного состава.

Эксперимент, имитирующий промывание пеплов в водоеме, организован следующим образом. Навеску пепла массой 50.0 г размешивали на магнитной мешалке в 500.0 мл воды с погруженным во взвесь солемером-кондуктометром Combo (Hanna), по времени записывали электропроводность, автоматически выполнялся пересчет в содержание хлорида натрия.

Дискретное промывание пепла, соответствующее выпадению осадков, организовано следующим образом. Навеска пепла массой 100.0 г промывалась на фильтре порциями 50.0 мл воды. Фильтрат собирали и высушивали до сухого остатка при температуре 105 °С, взвешивали на аналитических весах с точностью до 4 знака после запятой.

Результаты и обсуждение

Пепел представлен совокупностью обычных для Шивелуча породообразующих минералов, плагиоклазами, анортотоклазом и магнезиальной роговой обманкой. Растворимые соли пепла представлены хлоридом натрия и менее растворимым сульфатом кальция. Сульфаты и хлориды аммония, магния, калия, алюминия, железа и др. находятся в существенно меньших количествах (рис. 1). Растворимость сульфата кальция в кислых и в слабокислых средах повышается, а соли алюминия и железа (III) обеспечивают понижение рН благодаря гидролизу.

На рис. 2 показаны временные зависимости массы/концентрации вымываемых солей при дискретном промывании водой (пепел промывается дождем) и при постоянном нахождении в воде (пепел попал в водоем). При дискретном промывании водой наблюдается экстремум массы высвобождаемых солей, видимо, исходно, до контакта с водой, растворимые соли пепла были представлены не только сульфатом кальция и хлоридом натрия, но и хлоридом кальция с сульфатом натрия. Между ними протекает реакция с образованием сульфата кальция и галита, и можно отметить избыток хлорида кальция над сульфатом натрия. На рис. 1. видно, что в составе сухого остатка присутствуют следы гидратов хлорида кальция, в то время как сульфата натрия не наблюдается. А между тем, сульфат натрия это типичный минерал приповерхностных вулканических эксгальций, и его присутствие в составе разрушенного купола представляется весьма вероятным (*Сапрыкина и др., 2018*). Видимо, при контакте с водой сульфат натрия практически полностью переходит в сульфат кальция.

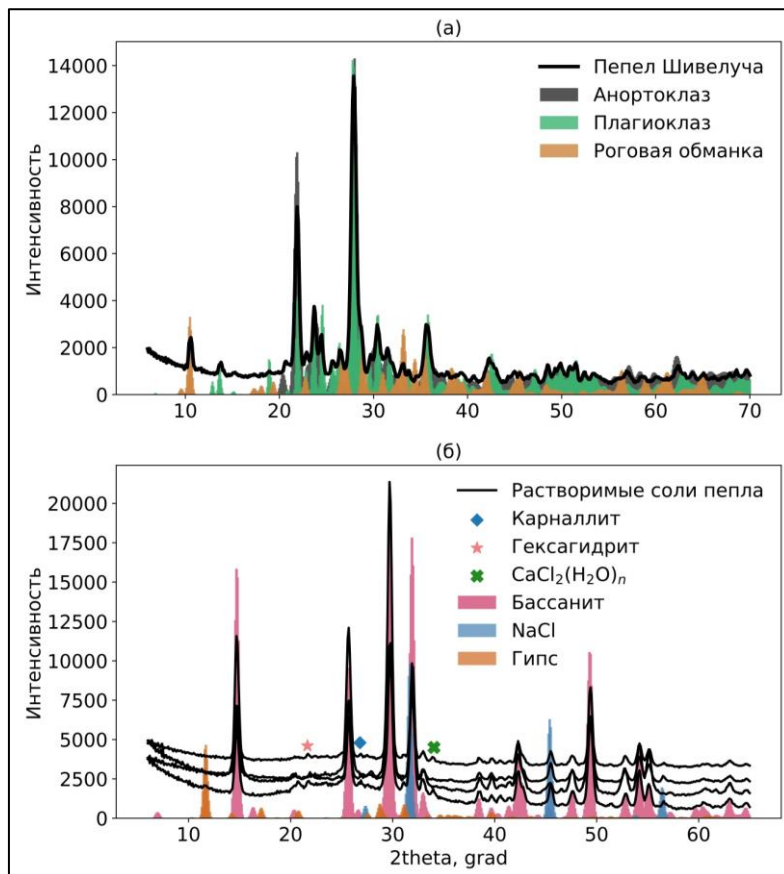


Рисунок 1 – Минеральный состав пепла Шивелуча от извержения апреля 2023 года (а), солевой состав сухого остатка водной вытяжки пепла

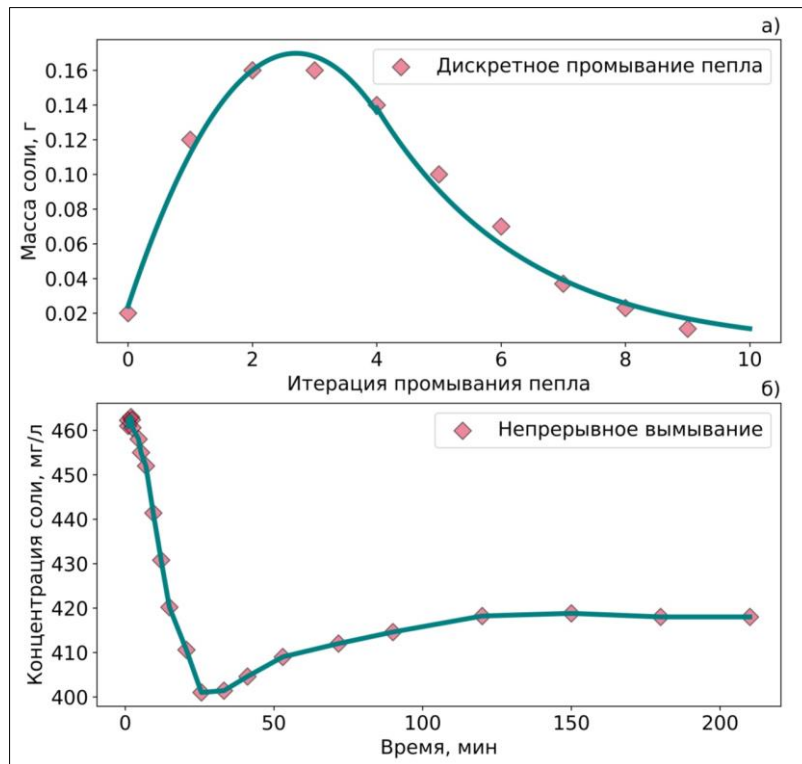


Рисунок 2 – Масса вымываемой соли в зависимости от количества промываний (а) и зависимость концентрации солей в пересчете на NaCl от времени (б)

В эксперименте с непрерывным промыванием пепла наблюдаем резкое возрастание концентрации в первые минуты контакта, затем следует плавное снижение, после которого содержание солей слегка увеличивается, асимптотически приближаясь к плато (рис. 2). Первые минуты знаменуют собой поступление солей в раствор, но затем между ними начинается реакция с образованием плохо растворимого сульфата кальция в виде гипса: $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2 + 2\text{NaCl}$, с чем и связано падение электропроводности/солесодержания. Осаждение гипса, либо образование малорастворимой взвеси на его основе приводит к соосаждению ряда элементов, например, стронция и бария, таким образом, химическая природа солей пепла Шивелуч позволяет говорить о самоочищении контактных вод от некоторых токсичных элементов.

По данным сайта Gismeteo (<https://www.gismeteo.ru/>), с апреля по август в поселке Ключи выпало порядка 287 мм осадков, что составляет 287 кг воды на квадратный метр поверхности. С учетом того, что масса пепла в поселке колебалась в пределах 30 – 60 кг/м², соотношение пепла и метеорной воды по массе варьируется в пределах 1:5 – 1:10, что оказалось вполне достаточно для промывания.

Заключение

Промывание пепла от солей метеорными водами осуществляется за несколько месяцев, при условии выпадения осадков, которые по массе в пять – десять раз превышают массу выпавшего пепла, в расчете на единицу площади. В ходе промывания возможны химические реакции между солями пепла, в результате может происходить самоочищение вод от некоторых компонентов.

Работа выполнена при поддержке РФФ по проекту № 23-27-00127

Список литературы

1. *Гирина О.А.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем / *О.А. Гирина, Е.А. Лупян, А. Хорват и др.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283–291.
2. *Sergeeva A.V.* The Ash Discharged by Sheveluch Volcano (Kamchatka, Russia) in April 2023 As a Source of Water-Soluble Salts / *A.V. Sergeeva, O.A. Girina, M.A. Nazarova, E.V. et al.* // J. Volcanolog. Seismol. 2024. V. 18. p. 307–322.
3. *Сапрыкина О.Ю.* Термическое расширение Na_2SO_4 (Стсм) и других полиморфов сульфата натрия / *О.Ю. Сапрыкина, Р.С. Бубнова, С.К. Филатов* // Физика и химия стекла. 2018. Т. 44. №. 6S. С. 87–91.

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

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

УДК 624.131.: 551.3

Инженерно-геологические аспекты исследования гидротермальных систем

Ю.В. Фролова¹, И.Е. Большаков¹

¹*МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия
ju_frolova@mail.ru*

При освоении геотермальных районов необходима оценка инженерно-геологических условий соответствующих территорий. Обобщение литературных данных по различным гидротермальным системам мира, а также многолетние исследования, проводимые на геотермальных площадях Камчатки и Курильских островов, показали, что с инженерно-геологической точки зрения эти районы обладают рядом специфических особенностей. Важнейшим геологическим процессом является гидротермальный метасоматоз, изменяющий состав, состояние и физико-механические свойства исходных пород. В свою очередь, это вызывает ряд геологических последствий, в том числе опасных, среди которых изменения рельефа, активизация эрозии, развитие обвально-оползневых процессов, деформации поверхности, миграция и изменение режима теплопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния массива и иные. Процессы и явления, возникающие в результате гидротермальной деятельности, как правило, взаимосвязаны между собой, образуя парагенетические ряды, а кроме того, в масштабе геологического времени протекают с высокой скоростью.

Ключевые слова: геотермальные районы, инженерно-геологические условия, опасные геологические процессы, физико-механические свойства, преобразования пород

Engineering-geological aspects of the hydrothermal systems study

Julia V. Frolova¹, Ilya E. Bolshakov¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia*

Developing of geothermal areas requires to assess the engineering-geological conditions of the territories. Generalization of literary data on various hydrothermal systems of the world, as well as long-term studies conducted in the geothermal areas of Kamchatka and the Kuril Islands, have shown that from an engineering-geological point of view, these areas have a number of specific features. The most important geological process is hydrothermal metasomatism, which changes the composition, state and physical and mechanical properties of the initial rocks. In turn, this causes a number of geological consequences, including hazardous ones, such as changes in relief, activation of erosion, development of landslides, surface deformations, migration and change in the regime of thermal manifestations, hydrothermal explosions, changes in the stress-strain state of the massif and others. The processes and phenomena that arise as a result of hydrothermal activity are usually interconnected, forming paragenetic series, and in addition, on the scale of geological time, they occur at a high speed.

Keywords: geothermal areas, engineering-geological settings, hazardous geological processes, physical and mechanical properties, rock alteration

Введение

При энергетическом, инженерно-хозяйственном и туристическом освоении геотермальных районов возникает целый комплекс задач и, прежде всего, необходима комплексная оценка инженерно-геологических условий соответствующих территорий. Под инженерно-геологическими условиями (ИГУ) понимаются компоненты геологической среды, влияющие на условия проектирования и строительства инженерных сооружений, а в более широком смысле – на условия освоения территории, в том числе, они определяют, какие могут возникнуть геологические опасности. Обобщение и анализ литературных данных по различным гидротермальным системам (ГТС) мира, а также многолетние исследования, проводимые на геотермальных площадях Камчатки (Паужетская, Гейзерная, Семячинская, Мутновская ГТС, Кошелевские и Камбальные термальные поля) и Курильских островов (Северо-Парамуширская и Баранского ГТС), показали, что с инженерно-геологической точки зрения эти районы обладают целым рядом специфических особенностей.

Специфика инженерно-геологических условий геотермальных районов

Спецификой геотермальных площадей являются масштабные преобразования массивов под действием циркулирующих гидротерм, охватывающие значительные объемы до глубины первых километров. Термальные флюиды разной температуры, химического состава и фазового состояния, воздействуя на вмещающие породы, изменяют их химико-минеральный состав, морфологию порово-трещинного пространства и физико-механические свойства (плотность, прочность, деформационные характеристики). В итоге формируются пространственно-неоднородные толщи, в составе которых представлены породы с очень контрастными свойствами. Это значительно усложняет методику исследования массивов гидротермально-измененных пород, в том числе, оценку их деформируемости и расчеты устойчивости. Среди продуктов гидротермального метасоматоза наиболее часто встречаются вторичные кварциты, пропилиты, кварц-адуляровые метасоматиты, аргиллизиты, опалиты. С инженерно-геологической точки зрения наиболее опасным процессом является гидротермальная аргиллизация, поскольку развитие глинистых минералов по первичным компонентам вулканогенных пород сопровождается разуплотнением, выщелачиванием, трещинообразованием с резким снижением прочностных и деформационных свойств. Аргиллизация может охватывать большие объемы пород до глубины нескольких сотен метров, а также развиваться в зонах разломов, однако наиболее интенсивные преобразования происходят в местах разгрузки парогидротерм на дневной поверхности. На термальных полях прочные вулканические массивы нередко полностью трансформируются в аргиллизиты, для которых характерна сильная изменчивость минерального состава и свойств даже в пределах небольших объемов пород. Например, при сильной аргиллизации андезитов их модуль упругости уменьшается в 3-4 раза, прочность на одноосное сжатие снижается в среднем на порядок. При полной трансформации вулканогенных пород в глины прочность на одноосное сжатие снижается на три порядка. Также значительно уменьшаются сдвиговые характеристики, отвечающие за устойчивость склона: сцепление - на два-три порядка, угол внутреннего трения в 2-3 раза (*Frolova et al., 2014*). В свою очередь, изменение физико-механических свойств пород при гидротермальной переработке влечет за собой ряд геологических последствий, в том числе, и опасных, среди которых локальные изменения рельефа, активизация эрозии, развитие обвально-оползневых процессов, деформации поверхности, миграция и изменение режима термопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния массива и иные (*Frolova et al., 2021*).

Процесс рельефообразования в геотермальных районах имеет специфические особенности, что во многом связано с воздействием разгружающихся гидротерм на окружающие их породы. Помимо оказываемого механического воздействия, термальные воды вызывают интенсивную переработку пород, сопровождаемую выщелачиванием, аргиллизацией, снижением прочности, что постепенно приводит к разрушению и выносу

вещества водными потоками. С течением времени происходит образование отрицательных форм рельефа в виде обширных эрозионных котловин, диаметром десятки - сотни метров. Дополнительному увеличению площади котловин способствуют обвально-оползневые процессы, которые происходят по их бортам, сложенным ослабленными гидротермальной деятельностью породами.

Склоновые гравитационные процессы в целом оказывают немалое влияние на формирование и изменение рельефа. Известны масштабные и быстрые изменения рельефа вследствие возникновения крупномасштабных обрушений и оползней. Так, например, случилось в Долине Гейзеров в 2007 и 2014 гг., когда произошли смещения пород, объемом порядка 20 млн. м³ и 3 млн. м³, соответственно (Zerkal, Gvozdeva, 2019). На термальных полях часто формируется характерная бугристая поверхность, которая образуется за счет вязкопластического движения увлажненных гидротермальных глинистых грунтов.

Разница в прочностных свойствах формирующихся гидротермально-метасоматических пород также является одной из причин, приводящих к изменению рельефа. Например, относительно прочные опалиты и вторичные кварциты слагают возвышенные участки (т.н. «опалитовые бугры»), а окружающие их гидротермальные глины, напротив, легко разрушаются, размываются, образуя отрицательные формы рельефа.

Таким образом, на участках поверхностных термопроявлений и прилегающих к ним территориях, наблюдаются специфические формы рельефа (как положительные, так и отрицательные), формирование которых вызвано изменением состава и свойств пород при гидротермальной переработке, а также эрозионными и оползневыми процессами, влияние которых повышается в условиях газогидротермальной активности. Особенностью рельефообразования на геотермальных площадях является высокая скорость, с которой могут происходить изменения геоморфологических структур.

Миграция и изменение режима поверхностных термопроявлений наблюдаются практически на всех изученных ГТС. Это хорошо иллюстрирует тот факт, что площадь распространения гидротермально измененных пород существенно превосходит участки современных термопроявлений. Например, на склонах Мутновского, Кошелевского и Камбального вулканических массивов распространены обширные покровы гидротермально измененных пород, в то время как выходы парогидротерм сконцентрированы лишь на отдельных участках в пределах современных термальных полей. Причины изменения режима и местоположения термопроявлений могут иметь как эндогенную, так и экзогенную природу. Одной из причин является изменение путей фильтрации флюидов сквозь толщу пород в ходе эволюции ГТС. За счет выщелачивания первичных компонентов пород и осаждения вторичных минералов в пустотах происходит структурно-минералогическая перестройка пород и изменение геометрии порового пространства: закрываются старые пути фильтрации и формируются новые каналы, по которым движутся флюиды. Определенную роль также могут играть изменение климатических условий, сейсмические события, оползневые процессы и пр. Дополнительное влияние на режим термопроявлений могут оказывать техногенные факторы. Например, строительство и эксплуатация геотермальных станций в Исландии, Новой Зеландии, США привело к исчезновению многих гейзеров (Атлас., 2016). На Камчатке перед запуском Паужетской ГеоТЭС в 1967 г. среди многочисленных термопроявлений функционировали два гейзера (Паужетские., 1965), однако после начала работы геотермальной станции они исчезли.

Активизация эрозионных процессов

В местах разгрузки термальных вод на поверхности, помимо обычного механического разрушения пород водным потоком, происходит их интенсивная переработка, сопровождаемая разуплотнением и снижением прочности. Это интенсифицирует эрозию, поскольку ослабленные гидротермальной переработкой породы легче разрушаются водными потоками. В результате образуются эрозионные впадины и котловины, диаметром десятки и сотни метров. Такие котловины наблюдаются на Южно-Камбальных, Нижне- и Верхне-

Кошелевских термальных полях, на участке Дачных термопроявлений на Мутновском вулкане, на склонах вулкана Баранского и многих других участках. Эрозионные процессы способствуют механическому выносу большого количества вещества и формированию отрицательных форм рельефа, что многократно усиливается за счет гидротермальной аргиллизации и ослабления вулканогенных пород. Кроме того, ручьи, берущие начало на термальных полях, выносят большое количество вещества в растворенном состоянии. Например, согласно оценке, проведенной для шести наиболее крупных ГТС Курильских островов, ежесуточный гидротермальный вынос составляет 122 тонны хлора и 124 тонны серы (Калачева, Таран, 2017). Происходящий в результате гидротермальных процессов вынос большого объема вещества во взвешенном и растворенном состоянии является одним из рельефообразующих факторов в геотермальных районах, а кроме того, он может снижать устойчивость вулканических построек, приводя к их обрушениям.

Оползневые процессы и явления широко распространены в геотермальных районах. В мировой практике известны случаи, когда они наносили экономический ущерб, нарушая работу скважин, повреждая сооружения геотермальных станций и даже приводили к человеческим жертвам (Voight, 1992). Оползни различных типов и масштабов происходят практически на всех исследованных термальных полях и прилегающих территориях. Наиболее распространены мелко-среднемасштабные неглубокие оползни, среди которых по механизму смещения выделяются оползни течения и оползни скольжения. Оползни течения представляют собой вязкопластические оползни-потоки, которые образуются в результате смещения увлажненных пластичных глинистых грунтов по подстилающему их прочному скальному основанию, сложенному вулканогенными породами. Оползни скольжения (блокового типа) образуются в сильно аргиллизированных вулканитах или плотных гидротермальных глинах с высоким содержанием кремнистых минералов. Обычно у оползней данного типа хорошо выражены морфологические элементы – оползневой цирк, стенка отрыва и оползневое тело, часто рассеченное поперечными трещинами. Помимо мелко-среднемасштабных оползней, формирующихся в приповерхностных горизонтах, известны случаи крупномасштабных событий, в том числе, оползней сложного механизма и каменных лавин, представляющих опасность при освоении геотермальных районов. Яркими примерами являются оползни, произошедшие в Долине Гейзеров в 2007 и 2014 гг. (Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Zerkal, Gvozdeva, 2019). Установлено, что помимо «классических» причин, способствующих возникновению оползней, дополнительным важным фактором явилась интенсивная гидротермальная деятельность и формирование в склоновом массиве ослабленных зон, сложенных сильноизмененными породами, вплоть до гидротермальных глин.

Гидротермальные взрывы являются достаточно частым явлением в геотермальных районах. Они представляют собой разрушительные события, которые могут привести к повреждению или разрушению зданий геотермальных станций, трубопроводов, скважин и прочей инфраструктуры, и даже к гибели людей. Проявления гидротермальных взрывов в виде глубоких воронок и характерных обломочных отложений и брекчий, зафиксированы и описаны в научной литературе для различных геотермальных районов мира (Rouwet et al., 2014). В пределах Курило-Камчатской дуги в качестве примеров можно привести озеро Кипящее в кальдере Головнина (о-в Кунашир), Голубые озера на ГТС вулкана Баранского (о-в Итуруп), юго-восточное фумарольное поле вулкана Эбеко (о-в Парамушир); следы вероятных взрывов отмечаются на Мутновской, Паужетской и Узон-Гейзерной ГТС и др.

Эндогенные геологические процессы. Поскольку геотермальные районы, как правило, располагаются в геодинамически активных зонах, то при их освоении необходимо учитывать вулканическую активность и сейсмичность. Для Курило-Камчатского региона интенсивность данных процессов достигает наивысшего уровня на Земле. В частности, по интенсивности сейсмичности (согласно шкале MSK-64) Восточная Камчатка с Курильскими островами относится к зоне 10-балльных землетрясений. Сейсмические события, как известно, являются триггерным фактором для развития обвально-оползневых процессов. Что касается вулканизма, то большинство ГТС локализовано на склонах и у подножий вулканических

построек, и хотя большинство из них возникло в плиоцен-плейстоценовое время, некоторые до сих пор находятся в активной стадии. Например, парогазовые и пепловые выбросы регулярно происходят на вулканах Эбеко и Мутновский, а в 2017 г. неожиданно произошло извержение Камбального вулкана.

Заключение

Геотермальные районы обладают целым рядом специфических особенностей, которые необходимо учитывать при освоении соответствующих территорий и оценке ИГУ. Одним из важнейших факторов является гидротермальный метасоматоз, оказывающий влияние на все компоненты ИГУ: состав, строение, состояние и свойства пород; микро- и мезорельеф; гидрогеологические условия (в том числе, режим и местоположение поверхностных термопроявлений); развитие геологических процессов (оползни, эрозия, оседание поверхности, гидротермальные взрывы); НДС массивов и иные. Процессы и явления, возникающие в результате гидротермальной деятельности, как правило, взаимосвязаны между собой и представляют определенную последовательность событий, образуя парагенетические ряды. Важной особенностью геотермальных площадей является высокая скорость происходящих геологических процессов.

Список литературы

1. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / *А.В. Завадская и др.* М.: КРАСАНД, 2016. 88 с.
2. *Двигало В.Н.* Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) / *В.Н. Двигало, И.В. Мелекесцев* // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С.24–37.
3. *Калачева Е.Г.* Роль гидротермальных систем Курильской островной дуги в выносе магматических компонентов / *Е.Г. Калачева, Ю.А. Таран* // Материалы XX региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню Вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2017. С. 169–172.
4. Паужетские горячие воды на Камчатке / *Ред. Б.И. Пийп, В.В. Аверьев, С.И. Набоко.* М.: Наука. 1965. 207 с.
5. *Пинегина Т.К.* Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. / *Т.К. Пинегина, И.Ф. Делемень, В.А. Дроздин, Е.Г. Калачева, С.А. Чирков, И.В. Мелекесцев, В.Н. Двигало, В.Л. Леонов, Н.И. Селиверстов* // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С.33–45.
6. *Frolova J.V.* Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril–Kamchatka island arc / *J.V. Frolova, V.M. Ladygin, S.N. Rychagov, D.Z. Zukhubaya* // Engineering Geology. 2014. Vol. 83. P. 80–95. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.10.011.
7. *Frolova J.V.* The Impact of Hydrothermal Alteration on the Geological Environment, Kamchatka Peninsula, Far East, Russia / *J.V. Frolova, M.S. Chernov, S.N. Rychagov, O.V. Zerkal* // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, April – October 2021.
8. *Rouwet D.* Recognizing and Tracking Volcanic Hazards Related to Non-Magmatic Unrest: a Review / *D. Rouwet, L. Sandri, W. Marzocchi, J. Gottsmann, J. Selva, R. Tonini, P. Papale* // Journal of Applied Volcanology. 2014. Vol. 3(17). P. 1–17.
9. *Voight B.* Causes of landslides: Conventional factors and special considerations for geothermal sites and volcanic regions / *B. Voight* // Geothermal Resources Council Transactions. 1992. Vol. 16. P. 529–533.
10. *Zerkal O.V.* Landslide activity and landslide hazard in Geyser Valley (Kamchatka Peninsula, Russia). In book: Natural hazards and risk research in Russia, Innovation and discovery in Russian science and engineering / *O.V. Zerkal, I.P. Gvozdeva.* Springer Int. Publ. AG, Switzerland, 2019. Vol.1. P. 317–344.

УДК 550.341.5

Моделирование сезонных вариаций естественных разгрузок Верхне-Паратунского геотермального месторождения

Н.Б. Журавлев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
zhuravlev-95@mail.ru*

Азотные гидротермальные системы характеризуются отсутствием магматического флюидного питания, поэтому их формирование рассматривается на термогидродинамических моделях сквозной проточной циркуляции от области атмосферного водного питания через систему резервуаров-аккумуляторов горячеводного теплоносителя до зоны разгрузки в условиях кондуктивного теплообмена. В качестве природного объекта для тестирования моделей используется Верхне-Паратунское геотермальное месторождение. Показана достаточность RZ радиально-цилиндрической структуры каналов гидротермальной системы для обеспечения наблюдаемых параметров ее тепловой и массовой разгрузки.

Ключевые слова: Термогидродинамическая модель, Верхне-Паратунский, структура, разгрузка, TOUGH2

Modeling of seasonal variations of natural discharge of Upper-Paratunsky geothermal field

Nikita B. Zhuravlev

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

The nitrogen hydrothermal systems are characterized by the absence of magmatic fluid supply, so their formation is considered on thermohydrodynamic models of through-flow circulation from the area of atmospheric water supply through the system of reservoirs-accumulators of hot-water coolant to the discharge zone under conditions of conductive heat exchange. The Upper Paratunsky geothermal field is used as a natural object to test this model. The paper shows the sufficiency of RZ radial-cylindrical channel structure of the hydrothermal system to provide the observed parameters of its thermal and mass discharge.

Keywords: Thermohydrodynamic model, Upper-Paratunsky, structure, discharge, TOUGH2

Введение

Низкотемпературные геотермальные месторождения, определяемые температурой резервуара до 150 °С на глубине 1 км (Arnason, 1976; Axelsson et al., 2010; Bodvarsson, 1983) как правило характеризуются преобладанием азота в газовом составе и отсутствием магматического флюидного питания. Несмотря на это, указанные месторождения продемонстрировали возможность многолетней (десятилетия) промышленной эксплуатации в Исландии, Венгрии, Китае, Турции, Франции, Германии, России и других странах (Кирюхин, 2020). Этот опыт позволил понять механизмы формирования таких месторождений, включая условия водного и теплового питания в естественных условиях и при эксплуатации, оценить характеристики резервуаров и степень возобновляемости ресурсов (Кирюхин и др., 2010).

Хотя вопросы гидрогеологии Паратунских геотермальных месторождений (Манухин и др., 1976), как и примеры Исландии, Рейнского грабена и других известных азотных низкотемпературных геотермальных месторождений мира достаточно обстоятельно проработаны, тем не менее остаются нерешенными фундаментальные и прикладные проблемы, связанные с условиями формирования азотных гидротермальных систем в целом.

Постановка задачи 1 (Heat Mining)

Рассмотрим радиально-цилиндрическую (RZ) модель условий формирования геотермального месторождения (рис. 1), соответствующую гидрогеологическим характеристикам Верхне-Паратунской гидротермальной системы в целом (Журавлев, 2023,

Кирюхин, Журавлев, 2024). Моделируемая область цилиндрической формы имеет внешний радиус $R = 14$ км и глубину $Z = 4.1$ км (+0.1, -4.0 км). По периферии цилиндра у его верхней границы задан контур водного питания: фиксированное состояние ($T = +5$ °С, P_b - гидростатическое +100 бар), на остальной поверхности кровли модели задается также фиксированное состояние ($T = +5$ °С, P_g - грунтовые воды +1 бар). Модель включает два основных домена – «проницаемые фильтрационные каналы» RESE* (проницаемость от 10^{-13} м² и выше) и «непроницаемые» вмещающие породы BASE (10^{-17} м²). В кровле продуктивного резервуара (см. ниже) на расстоянии 2.2 и 4.1 км от центра модели задаются две разгрузки (VP и K) в режиме самоизлива («well on deliverability», $PI = 1.0E - 11$ м³, $P_{wb} = 82$ бар при $z = 650$ м). Тепловое питание определено на подошве (-4 км) – кондуктивный тепловой поток 60 мВт/м². Начальное распределение T и P – линейное возрастание с глубиной $T = 5 - 0.025 \cdot Z$, $P = 6.0 - 0.1 \cdot Z$ (бар).

Проводящий домен RESR* состоит из субдоменов - цилиндрического канала разгрузки RESRD ($r = 100$ м), области транзита - горизонтального диска в основании RESRT ($M = 100$ м), области водного питания RESRR (внешнего цилиндра) и области аккумуляции термальных флюидов (продуктивный геотермальный резервуар) RESRP (радиусом ≈ 5 км и мощностью 500 м (диапазон глубин -400 м, -900 м).

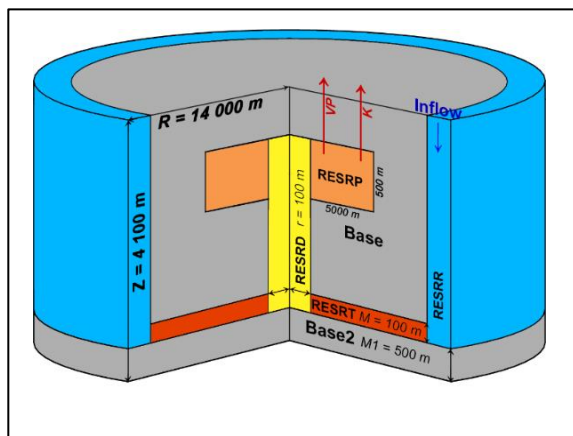


Рисунок 1 – Радиально-цилиндрическая (R-Z) геометрия области моделирования и зонирование модели на домены с различными фильтрационно-емкостными и теплофизическими свойствами (значения параметров указано в табл.)

Цель моделирования заключалась в сборке соответствующей указанной выше условиям радиально-цилиндрической (RZ) модели (на сетке 40×40), выяснение с применением моделирования возможности разгрузки с температурой 60 °С и расходом 60 кг/с (разгрузка VP) в течение интервала времени от 4000 до 6000 лет после начала функционирования гидротермальной системы.

Результаты моделирования (Задача 1)

Значения фильтрационно-ёмкостных свойств доменов, обеспечивающие формирование и поддержание естественной разгрузки Верхне-Паратунских источников, определены с применением прямого и инверсионного моделирования с применением программ PetraSim 5 (PetraSim., 2023) и iTOUGH2. Для калибровки модели использованы данные по естественной разгрузке В-Паратунской гидротермальной системы, указанные выше. Расчетные параметры модели указаны в Таблице.

Таблица. Фильтрационно-емкостные и теплофизические свойства доменов, заданные на модели.

Примечание: оцениваемые параметры выделены полужирным шрифтом

Материальные свойства	Домен модели					
	BASE	BASE2	RESRR	RESRT	RESRD	RESRP
Минерал. плотность, кг/м ³	2600					
Пористость	0.1					
Проницаемость, м ²	10^{-17}	10^{-17}	$3 \cdot 10^{-13}$	$1.1 \cdot 10^{-12}$	$3.72 \cdot 10^{-13}$	$3.85 \cdot 10^{-13}$
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	2	5	2	2	2	2
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	1000					
Сжимаемость, Па ⁻¹	10^{-8}					

Постановка задачи 2 (Boundary Conditions)

Задача Bound Conditions является продолжением задачи Heat mining (см. выше), в этой задаче на модели оценивается эффект граничных условий на характеристики разгрузки из гидротермальной системы. А именно, на модели рассматривается влияние изменяющихся во времени граничных условий: (1) на контуре водного питания, где задается гидростатическое давление P_b ; (2) на кровле продуктивного резервуара, где задается давление горизонта грунтовых вод P_g – на расход и температуру разгрузки (VP), заданной в режиме самоизлива (см. выше).

Исходные данные для калибровки модели по расходу и температуре разгрузок термоминеральных источников показаны на рис. 2. Для определения на модели изменяющихся во времени граничных условий Дирихле (Fixed State) используется метод, изложенный в (PetraSim., 2023).

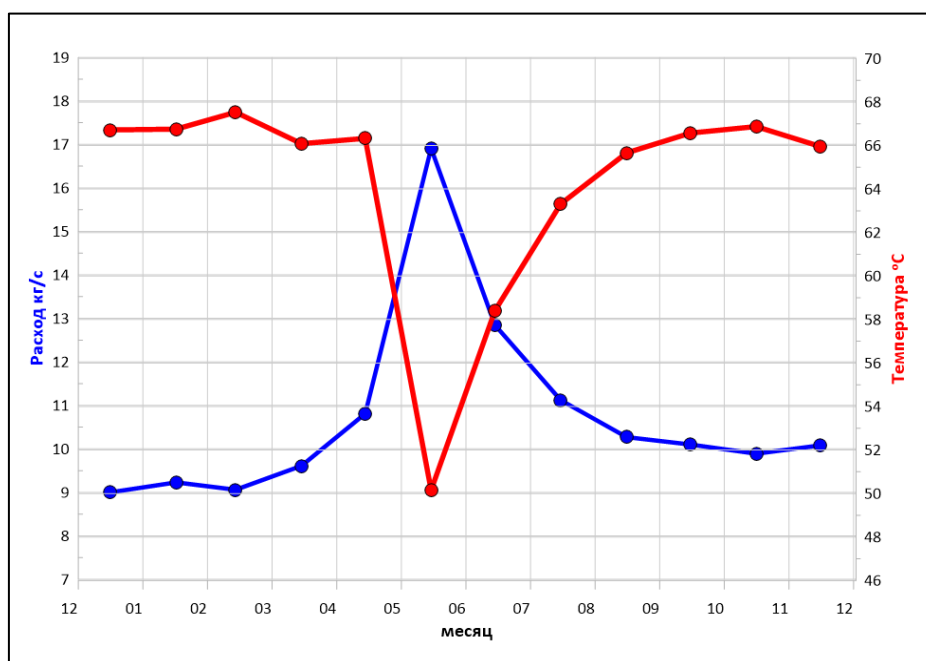


Рисунок 2 – Сезонное изменение разгрузки VP (Верхне-Паратунский источник) по данным (Мальцева и др., 1993)

Результаты моделирования (Задача 2)

Для калибровки модели потребовалась детализация зоны разгрузки VP в виде вертикального канала от кровли резервуара до области разгрузки, с заданным изменяющимся во времени давлением (time dependent Dirichlet boundary conditions).

В результате моделирования воспроизведены изменения наблюдаемых вариаций разгрузки гидротермальной системы: дебита термальных источников (рис. 2). Сезонные вариации контролируются циклическим увеличением давления на 10 бар в области разгрузки в период с июня по июль. Моделирование не выявило существенного влияния граничных условий, задаваемых в области водного питания, на параметры разгрузки гидротермальной системы.

Для калибровки модели по температуре потребовалось ее преобразование с учетом «двойной пористости» (MINC 3D, FS = 100 m, FF = 0.01).

Заключение

1. С применением термогидродинамического моделирования показана принципиальная возможность формирования циркуляционной гидротермальной системы в радиально-цилиндрической структуре (кальдера) диаметром около 15 км и глубиной циркуляции –3 км в течение первых тысяч лет с параметрами разгрузки близкими к оцениваемому диапазону разгрузок В-Паратунской гидротермальной системы (температура 60 °C и расход 60 кг/с). Ключевыми калибровочными параметрами модели являлись

проницаемости каналов водного питания, латерального транзита на глубине –3 км, восходящей фильтрации и продуктивного резервуара (в диапазоне глубин от –1 до 0.5 км), а также величина теплопроводности фундамента (глубже –3 км).

2. Калибровка модели по данным природного сезонного изменения температуры и расхода разгрузки В-Паратунских источников (до начала эксплуатации) показывает наибольшую чувствительность разгрузки к изменениям давления во внутренней области разгрузки, и отсутствие значимого влияния граничных условий в области внешнего водного питания. Сезонные изменения температуры разгрузки объясняются на модели с учетом двойной пористости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопродводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127 (<https://rscf.ru/project/23-27-00127/>).

Список литературы

1. Журавлев Н.Б. Концептуальная модель теплового питания низкотемпературного геотермального месторождения без дополнительных тепловых источников / Н.Б. Журавлев // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2023), 4 – 10 сентября 2023 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. с. 37–40.

2. Кирюхин А.В. Гидрогеология вулканогенов / А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин // С-Петербург. Наука. 2010. 395 с.

3. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.

4. Кирюхин А.В. Моделирование условий формирования азотных гидротермальных систем / А.В. Кирюхин, Н.Б. Журавлев // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием), г. Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г. Екатеринбург: Институт горного дела ИГД УрО РАН, 2024. С. 274–279. URL: https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/2024_podzemnaya_gidrosfera.pdf.

5. Манухин Ю.Ф. Гидрогеология Паратунской гидротермальной системы и условия ее формирования / Ю.Ф. Манухин, Л.А. Ворожейкина // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 143–178.

6. Мальцева К.И. Изучение режима подземных вод на участках опорной гидрогеологической сети, репрезентативном бассейне «Плотникова-Дальний. Многолетний отчет по изучению режима подземных вод на территории Камчатской области за 1986–1990 гг. / К.И. Мальцева, И.Н. Нажалова, И.С. Раичева // ГГП «Камчатгеология»: Термальный, 1993. 230 с.

7. Arnason B. Hydrothermal Systems in Iceland Traced by Deuterium / B. Arnason // Geothermics, 1976. Vol. 5. No. 1/4. P. 71–81.

8. Axelsson G. Low temperature geothermal utilization in Iceland – Decades of experience / G. Axelsson, E. Gunnlaugsson, Th. Jonasson, M. Olafsson // Geothermics, 2010. No. 39. P. 329–33.

9. Bodvarsson G. Temperature/flow statistics and thermodynamics of low temperature geothermal systems in Iceland // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1983. No. 19. P. 255–280.

10. PetraSim User Manual [Электронный ресурс]: Rockware, 2023. URL: <https://www.rockware.com/downloads/documentation/petrasim/PetraSimManual.pdf> (дата обращения: 26.07.2024).

РАЗДЕЛ VI. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ

CHAPTER VI. CONDITIONS FOR THE FORMATION AND EXPLOITATION OF GEOTHERMAL AND HYDROCARBON DEPOSITS OF COMPLEX STRUCTURE

УДК 553.493.34:551.242.5

Геологическая модель формирования Ангаро-Ленского месторождения промышленных литиеносных рассолов – геодинамический, гидрогеохимический аспекты

А.Г. Вахромеев^{1,8}, М.А. Данилова^{2,8}, Д.А. Погребная³, А.В. Сергеева⁴, Д.О. Мамаков⁵,
А.Т. Корольков⁶, А.В. Кирюхин⁴, Е.Д. Михеева⁷

¹*Институт земной коры, Иркутск, Россия
andrey_igr@mail.ru*

²*ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», г. Красноярск, Россия*

³*Москва, «Энерджи Крафт»; Россия*

⁴*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

⁵*ООО «Сибгаз», Иркутск, Россия;*

⁶*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

⁷*ФГБУ «ВИМС», г. Москва*

⁸*Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, Россия*

Сибирская платформа (СП) – крупнейшая литиеносная металлогеническая провинция мира. Плюм тектоника – ключ к изучению специальной металлогении лития Сибирского кратона с современных геодинамических позиций. Однако геологические и геодинамические условия, при которых литий поступал в промежуточные магматические очаги верхней коры и в рассолы, изучены недостаточно. На примере одного из месторождений – Ангаро-Ленского – рассмотрены генезис, вероятные мантийные и коровые источники неогерентного лития, и процессы его накопления в осадочном чехле до высоких концентраций.

Ключевые слова: Сибирская платформа, металлогения лития, магматический очаг, рассолы

Geological model of formation of the Angara-Lena deposit of industrial lithium brines – geodynamic, hydrogeochemical aspects

Andrey G. Vakhromeev^{1,8}, Maria A. Danilova^{2,8}, Darya A. Pogrebnaya³, Anastasia V. Sergeeva⁴,
Denis O. Mamakov⁵, Alexey T. Korolkov⁶, Alexey V. Kiryukhin⁴, Ekaterina D. Mikheeva⁷

¹*Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, Russia*

²*ООО "RN-Krasnoyarsk Oil Company", Krasnoyarsk, Russia*

³*Moscow, Energy Craft; Russia*

⁴*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

⁵*ООО Sibgaz, Irkutsk, Russia;*

⁶*Irkuta State University, Irkutsk, Russia*

⁷*FGBU «VIMS», Moscow*

⁸*Irkuta State Technical University, Irkutsk, Russia*

The Siberian Platform (SP) is the largest lithium-bearing metallogenic province in the world. Plume tectonics is the key to studying the special lithium metallogeny of the Siberian craton from modern geodynamic positions. However, the geological and geodynamic conditions under which lithium entered the intermediate magmatic foci of the upper crust and into brines have not been sufficiently studied. The genesis, probable mantle

and crustal sources of incoherent lithium, and the processes of its accumulation in the sedimentary cover to high concentrations are considered on the example of one of the deposits – Angaro-Lensky.

Keywords: Siberian platform, lithium metallogeny, magmatic center, brines

Известно, что литий образует промышленные концентрации в трех формациях экзогенного цикла: в вулканогенно-осадочных, в корах выветривания на нефелиновых сиенитах и в природных рассолах (*Геохимия...*, 1964; *Солодов*, 1978). Очевидно, что для анализа роли главных циклов формирования ресурсной базы гидроминерального литиеносного сырья имеет смысл раздельно, поэтапно рассматривать процессы поступления первично эндогенного лития из магматических пород в бассейн осадконакопления, процессы эволюционного концентрирования «вода-порода» в хлоридных рассолах, и как самостоятельный цикл выделить аномальные, импульсные процессы тектоно-вулканической деятельности на территории СП (*Фон-дер-Флаасс и др.*, 2000; *Кирюхин*, 2022), которые привели к кратному увеличению концентрации лития в рассолах средней, соленосной формации осадочного чехла.

Литий является типичным редким элементом для пород кислого состава, содержится в гранитоидах в повышенных количествах по сравнению с кларками земной коры, а с дериватами и постмагматическими образованиями гранитоидов (пегматитами, грейзенами, альбитизированными гранитами) часто связаны месторождения лития (*Геохимия...*, 1964; *Солодов*, 1978; *Летникова*, 2008). Но эндогенные месторождения не могут служить в полной мере основой формирования концентраций лития в осадочных толщах, а вероятно формируют лишь локальные вторичные ореолы концентраций (*Геохимия...*, 1964; *Солодов*, 1978) данного элемента в близлежащих глинистых породах, т.к. при выветривании эндогенных месторождений литий сорбируется из воды коллоидными частичками глин, прочно входит в их кристаллические решетки. В итоге то количество лития, которое привносится в седиментационный процесс эндогенными месторождениями совершенно ничтожно по сравнению с его общим количеством, высвобождающимся при выветривании изверженных пород.

Активная миграция лития в поверхностных условиях ограничена, литий ассоциирует с глинами еще в пределах зоны выветривания, и в морскую воду попадает уже в связанной форме, поэтому в большинстве случаев этот элемент мигрирует «пассивно», находясь в глинистых взвесах. Таким образом, содержание лития в природных рассолах глубоких горизонтов Сибирского бассейна осадконакопления, вероятно, «регулировалось» тем количеством лития, что привносилось в ионной форме. И ограничивалось сорбцией его глинистыми минералами донных осадков при превышении ими определенного уровня ($2 \cdot 10^{-5} \%$). При образовании глинистых отложений литий особенно легко входит в трехслойные пакеты минералов группы гидрослюд – монтмориллонит, необычно высокое содержание лития отмечается в гекторитах (литиевый монтмориллонит), и в некоторых содержаниях марганца. Учитывая, что глинистые породы составляют около 60–65% от всей массы осадочных пород, а содержание лития в них повышенное, соответственно, основное количество лития в осадочном чехле первично связано с глинистыми породами. В процессе эволюционного уплотнения осадков в бассейне, отжима конденсационной воды происходит перемещение воды и, соответственно, иона лития, в сопредельные породы-коллекторы. Важно учитывать, что ион лития, обладающий сравнительно высокой энергией гидратации, будет вытесняться из сорбента другими щелочными и щелочноземельными элементами, что приведет к увеличению его концентрации в подземных водах.

В дальнейшем, в процессе испарительного концентрирования морской воды солеродных бассейнов щелочные элементы длительное время сохраняются в растворе. Рубидий и цезий соосаждаются с калийными солями, особенно с карналлитом, литий же способен концентрироваться в рассолах до эвтоники. Таким образом, концентрирование редкометальных бромолитиевых рассолов до состояния эвтектики/эвтоники проходило по стадиям: эвакуации лития из магматических горных пород фундамента и терригенных толщ

протерозоя и венда – обмен в системе «вода-порода» (Шварцев, 1977); формирования эвапоритовых бассейнов с концентрированием рассолов-рапы до галитовой и карналлитовой составляющих. Накопление лития в осадках засоленных озер и лагун и в рассолах сопровождалось значительными событиями, обусловленными соляной и шарьяжно-надвиговой тектоникой, связанной с развитием сложных конвергентных границ при закрытии Палеоазиатского океана.

Экспериментальными исследованиями по испарительному концентрированию морской воды были установлены максимальные концентрации редких щелочных элементов в продуктах ее сгущения (мг/дм³): *Li 30, Rb 10, Cs 1.* (Геохимия., 1964). Однако максимальные концентрации лития в предельно насыщенных рассолах СП достигает 700 мг/л, в рассолах саларов Южной Америки до 7000 мг/л. Объяснением таких высоких концентраций помимо испарительного концентрирования может служить модель влияния мантийного источника на осадочные породы и подземные воды, в них заключенные. Одна из важнейших стадий развития чехла объединяет процессы активизации, обусловленные рассеянным рифтогенезом, которые широко проявились на платформе в периоды кимберлитового и траппового магматизма, а также в постмагматические этапы гидротермальной деятельности вулканических аппаратов (Фон-дер-Флаасс и др., 2000; Кирюхин, 2022). Эти этапы были катализатором импульсной геодинамической эволюции состава флюидных систем вулканогенно-осадочного чехла кратона, способствовавших обогащению рассолов щелочными металлами. Обогащение шло в процессе вулканической деятельности, которая протекала на гигантской территории платформы, что предполагает магматогенный, ювенильный источник флюидов и редких металлов, включая некогерентные литий, бор. В результате внедрения магмы в природные резервуары чехла по механизму ГРП происходило вскипание и удаление воды как растворителя в виде пара с повторным обогащением литием и другими редкими элементами из следующих порций «по циркуляции». Высокими давлениями обусловлено внедрение кипящих пересыщенных рассолов в межсолевые карбонатные пласты коллекторов в области апикальных частей трапповых силлов и секущих интрузий. Изоляция циркулирующих гидротермальных рассольных систем шла при остывании базальтовой магмы и формировании долеритовых силлов с консервацией (Кирюхин, 2022) этих залежей кепроком. Дальнейшее повышение давления флюидов приводило к авто-ГРП, и перетоку в новые трещинные системы в межсолевых карбонатных коллекторах.

Известно, что на Сибирской платформе отмечаются зоны с аномально-высокими пластовыми давлениями (АВПД) флюидов, где скважины фонтанируют рассолами с дебитами до 5000-7000 м³/сут (Алексеев и др., 2014). Это область связана с границей закрытия Палеоазиатского океана, локализована в пределах Ангаро-Ленского артезианского бассейна, и трактуется авторами как одноименное Ангаро-Ленское месторождение промышленных металлоносных бром-содержащих рассолов. Здесь, на основе интерпретации современных данных сейсморазведки, фиксируются пограничная область гигантского Усольского силла с северо-запада, и шарьяжно-надвиговые структуры Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса (Вахромеев и др., 2006) с юго-востока (рис. 1). В этой пограничной области бурением выявлены перспективные зоны с АВПД предельно насыщенных рассолов с высокими концентрациями редких металлов – лития, рубидия, цезия. Разработка соподчиненности, иерархии понятий «рудоносная гидроминеральная провинция – субпровинция (металлогеническая зона) – рудный район – месторождение» (Фон-дер-Флаасс и др., 2000) применительно к гидроминеральному сырью будет представлена авторами в докладе.

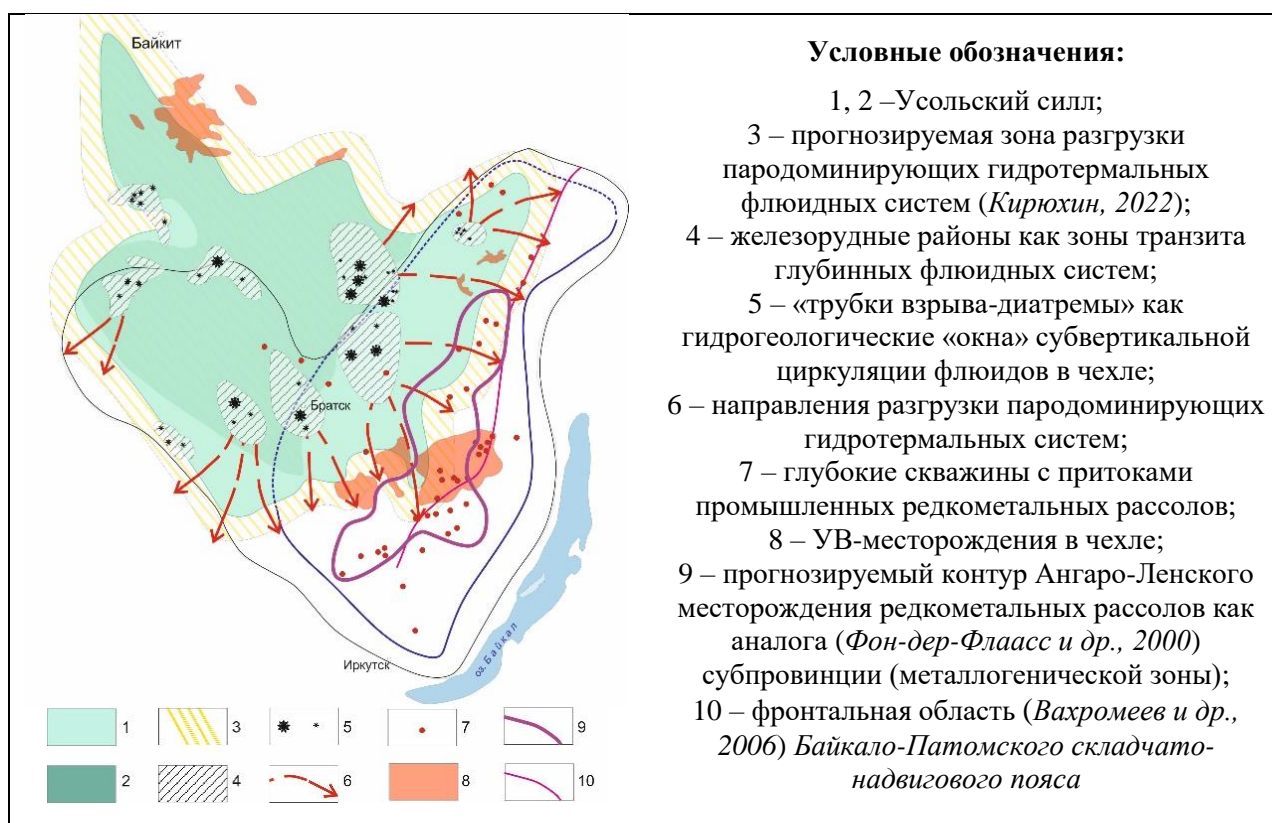


Рисунок 1 – Магматогенно-гидротермальная модель преобразования природных резервуаров и флюидных систем осадочного чехла под воздействием магмы Усольского силла.
Подготовлено: Вахромеев А.Г., Данилова М.А.

Выводы

Рассмотрены мега - процессы сохранения и разрушения залежей рассолов с литием. На процессы накопления лития в осадках засоленных лагун и в рассолах наложились масштабные события, обусловленными соляной и шарьяжно-надвиговой тектоникой, связанной с развитием сложных конвергентных границ при закрытии Палеоазиатского океана, континентальным базальтоидным и кимберлитовым магматизмом. Концентрирование редкометалльных бромолитиевых рассолов до состояния эвтектики/эвтоники происходило в несколько стадий: 1) эвакуации лития из магматических горных пород фундамента и терригенных толщ протерозоя и венда – обмен в системе «вода-порода»; 2) формирование эвапоритовых бассейнов с концентрированием рассолов-рапы до галитовой и карналлитовой составляющих, 3) на этапах платформенного магматизма – вскипание и удаления воды как растворителя в виде пара с повторным обогащением литием и другими некогерентными элементами из следующих порций «по циркуляции», 4) внедрение кипящих пересыщенных рассолов в межсолевые карбонатные пласты коллекторов в области апикальных частей трапповых силлов и секущих интрузий с консервацией этих залежей кепроком (Кирюхин, 2022), 5) закрытие циркулирующих гидротермальных рассольных систем (Кирюхин, 2022) при остывании базальтовой магмы и формировании долеритовых силлов. В этом цикле дальнейшее повышение давления флюидов приводило к авто-ГРП и перетокам в новые трещинные системы в межсолевых карбонатных коллекторах раннего кембрия. Изучение шарьяжно-надвиговых структур (Вахромеев и др., 2006; Кирюхин, 2022) на основе интерпретации современных данных сейсморазведки показало перспективность обнаружения трещинных резервуаров в поднадвиговых зонах – инъективных тел «рапа-силлов», т.е залежей литиеносного гидроминерального сырья.

Заключение

Анализ геодинамической эволюции Сибирского кратона и окружающих его аккреционно-коллизийных областей для миграции и накопления лития позволяет сделать следующие выводы: 1) чехол кратона импульсно обогащался литием в рифее, венде и нижнем кембрии; 2) первоначальное поступление лития произошло в авлакогены и связано, вероятно, с расколом Родинии над горячей областью мантии и зарождением Палеоазиатского океана; 3) наиболее высокие концентрации лития формируются в два этапа: *в венде, и раннем кембрии* при формировании синеклиз в начале образования плитной стадии чехла, когда Сибирский кратон находился в южном полушарии вблизи южного тропика; *в перми и триасе*, когда происходили эпигенетические изменения под действием двух независимых процессов – гидротермального обогащения из мантийного и промежуточного источников вещества и кипения рассолов над расплавленными силлами; 4) *залежи наиболее концентрированных предельно насыщенных рассолов локализованы над силлами*, внедрявшимися в осадочный чехол в процессе траппового магматизма, и *тяготеют в плане к краевым областям выклинивания магматических тел (силлов)*; б) *ловушки в межсолевых карбонатных природных резервуарах с высокими концентрациями лития в рассолах сформированы чешуйчато-надвиговыми структурами* солевого и надсолевого комплексов осадочного чехла.

Рассмотренная геохимическая, металлогеническая система с длительным геологическим циклом эволюции химического состава природной «смеси» седиментологических, глубоко метаморфизованных и гидротермально преобразованных редкометальных рассолов занимает особое место в специальной металлогении-минерагении лития, относительно мало изучена. Исследование ориентировано на поиск генетических связей металлоносности рассолов Сибирской платформы с плюм- и плей- тектоникой, эволюцией глубинных структура кратона и платформенным магматизмом.

Список литературы

1. *Алексеев С.В.* Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация // *С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев* // Иркутск: Изд-во ООО «Географ». 2014. 162 с.
2. Геохимия, минерагения и генетические типы месторождений редких элементов. Т.1. Геохимия редких элементов. Наука, Москва, 1964. 674 с.
3. *Солодов Н.А.* Минерагения литофильных редких металлов. М. Недра. 1978. 175 с.
4. *Шварцев С.Л.* О формировании крепких и предельно насыщенных подземных рассолов. Проблемы соленакопления. Т.1. Новосибирск: Наука. 1977. С. 192–195.
5. *Фон-дер-Флаасс Г.С.* Атлас структур рудных полей железорудных месторождений / *Г.С. Фон-дер-Флаасс, В.И. Никулин* // Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2000. – 192 с.
6. *Вахромеев А.Г.* Роль шарьяжно-надвиговой тектоники в формировании аномально-высоких пластовых давлений и промышленных металлоносных рассолов Сибирской платформы / *А.Г. Вахромеев, В.А. Сизых* // Доклады РАН. - 2006. - № 2. - С. 1–5.
7. *Летникова Е.Ф.* Геохимические типы карбонатных отложений южного обрамления Сибирской платформы // Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск. 2008.
8. *Кирюхин А.В.* Геомеханические условия формирования вулканических и гидротермальных систем // Geothermal Volcanology Workshop 2022). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 9–13.

Нефтеуглеводороды в глинах Долины Гейзеров и Кальдеры Узон

Д.О. Мартыненко^{1,2}, А.В. Сергеева¹

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

²*Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, Россия
darri.martynenko@yandex.ru*

Проведена оценка содержания нефтеуглеводородов в глинистых материалах грязевых котлов кальдеры вулкана Узон и Долины Гейзеров. Отбор образцов для исследования проводили в районе гейзера Шаман кальдеры вулкана Узон и в районе гейзера Великан Долины Гейзеров. Материал отбирался с поверхностных горизонтов глинистых грунтов методом «конверта». Содержание нефтеуглеводородов в исследованных глинах варьировало в пределах 20,4–26 мг/кг, что соответствует естественному фону территории (по В.С. Хомичу). Наиболее высокие показатели выявлены в образцах грязевого котла неподалеку от гейзера Шаман, кальдеры Узон – 26 мг/кг. Наличие нефтеуглеводородов в исследуемых образцах может быть обусловлено содержанием в порах глины различных фракций выходящей на поверхность капельной нефти. Помимо этого, поступление нефтяных углеводородов в почвы и грунты возможно путем глобального атмосферного переноса из промышленных районов, поэтому качественный состав найденных углеводородов требует уточнения.

Ключевые слова: нефтеуглеводороды, Долина Гейзеров, кальдера Узон

Petroleum hydrocarbons in the clays of the Valley of Geysers and the Uzon Caldera

Darina O. Martynenko^{1,2}, Anastasia V. Sergeeva¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

²*Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

The assessment of the content of petroleum hydrocarbons in the clay materials of mud boilers of the Uzon volcano caldera and the Valley of Geysers was carried out. Sampling for the study was carried out in the area of the Shaman geyser of the Uzon volcano caldera and in the area of the Giant geyser of the Valley of Geysers. The material was taken from the surface horizons of clay soils by the «envelope» method. The content of petroleum hydrocarbons in the studied clays varied in the range of 20.4–26 mg/kg, which corresponds to the natural background of the territory (according to V.S. Khomich). The highest values were found in samples of a muddy pot near the Shaman geyser, Uzon caldera – 26 mg/kg. The presence of petroleum hydrocarbons in the studied samples may be due to the content of various fractions of droplet oil coming to the surface in the clay pores. In addition, the supply of petroleum hydrocarbons to soils and soils is possible through global atmospheric transport from highly developed industrial areas, therefore, the qualitative composition of the found hydrocarbons requires clarification.

Keywords: petroleum hydrocarbons, Valley of Geysers, Uzon caldera

Нефтяные проявления на Камчатке известны достаточно давно. Особенно примечательным местом с выходом нефтеуглеводородов является район кальдеры Узон, где располагается одна из крупнейших гидротермальных систем Камчатки, объединенная с Долиной Гейзеров. (Добрецов и др., 2015; Варфоломеев и др., 2011). Известно, что капельно-жидкая нефть выходит практически по всему восточному полю данной гидротермальной системы (Варфоломеев и др., 2011). Очевидно, что выходящие на поверхность нефтеуглеводороды могут аккумулироваться в твердых компонентах среды, в их числе – глинистые грунты. Цель работы – определить количественное содержание нефтеуглеводородов в некоторых глинах Долины Гейзеров и кальдеры Узон.

Отбор образцов для исследования проводили в районе гейзера Шаман кальдеры вулкана Узон (возле него и в грязевом котле неподалеку) и в районе гейзера Великан,

расположенном в Долине Гейзеров. Материал отбирался с поверхностных горизонтов глинистых грунтов методом «конверта». Подготовку образцов и их анализ проводили в Аналитическом центре Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН методом ИК-спектроскопии согласно аттестованной методике ПНД Ф 16.1:2.2.22–98 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии» на Концентрационном КН–1 (Сибэкоприбор, Россия).

Полученные данные показали небольшие вариации содержания нефтеуглеводородов в глинах районов кальдеры Узон и Долины Гейзеров. Содержание нефтяных углеводородов в глине возле гейзера Шаман (кальдера Узон) составило – 22 мг/кг, а в грязеводном котле неподалеку от него – 26 мг/кг. В глинистых образцах гейзера Великан (Долина Гейзеров) было обнаружено не более 20.4 мг/кг.

Полученные данные свидетельствуют о естественном фоне содержания нефтеуглеводородов (по В.С. Хомичу, 2005). Наличие нефтеуглеводородов в исследуемых образцах может быть обусловлено содержанием в порах глин различных фракций выходящей на поверхность капельной нефти. При этом глины обладают экранирующими свойствами, которые во многом зависят от их проницаемости и пористости (Александров и др., 1981), что так же предотвращает поступление большего количества нефтеуглеводородов в окружающую среду. Помимо этого, поступление нефтяных углеводородов в почвы и грунты возможны путем глобального атмосферного переноса из промышленных районов (Жарикова, 2022), поэтому качественный состав найденных углеводородов требует изучения.

Список литературы:

1. Добрецов Н.Л. Геологические, геохимические и микробиологические особенности нефтяной площадки кальдеры Узон (Камчатка) / Н.Л. Добрецов, Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик и др. // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 1–2. С. 56–88.
2. Варфоломеев С.Д. Самая молодая нефть земли / С.Д. Варфоломеев, Г.А. Карпов, Г.А. Синал и др. // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438, № 3. С. 345–347. EDN NWDCKT.
3. Хомич В.С. Загрязнение почв нефтепродуктами в Беларуси // Природные ресурсы. 2005. № 2. С. 43–53.
4. Александров Б.Л. Изучение водопроницаемости глинистых пород на искусственных образцах / Б.Л. Александров, Б.Д. Антипов, В.С. Афанасьев, Е.Л. Кириченко // Геология нефти и газа. 1981. № 8.
5. Жарикова Е.А. Содержание нефтепродуктов в естественных и антропогенных почвах Приморского края // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 1. С. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2022.1/9089>.

УДК 579.26

Альгоценозы термальных полей Мутновского месторождения

Л.А. Позолотина^{1,2}, Т.А. Ключкова²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
rozolotina@mail.ru

²Камчатский государственный технический университет (КамчатГТУ), Россия

Рассмотрена структура водорослевых сообществ термального поля и некоторых источников Мутновского геотермального месторождения. Видовой состав исследуемых образцов микроводорослей обеднен. На Пиратовских источниках преобладают *Phormidium* sp., из класса диатомовых водорослей (*Diatomeae*) является *Symbella* sp.

Ключевые слова: Phormidium, Diatomeae, синезеленые водоросли

Algocenoses of Thermal Fields of the Mutnovsky Geothermal region

Liliia A. Pozolotina^{1,2}, Tatyana A. Klochkova²

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

²*Kamchatka State Technical University (KamchatGTU), Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

The structure of the algae communities of the thermal field and some sources of the Mutnovsky geothermal region is considered. The species diversity of the studied samples is scarce. *Phormidium* sp. predominates on Piratovsky spring. The most common species from the class *Diatomeae* is *Cymbella* sp.

Keywords: Phormidium, Diatomeae, bluegreen algae

Введение

В отдельных исследованных гидротермах Камчатки были обнаружены микроводоросли, относящиеся к сине-зеленым и диатомовым. Доминантами являлись цианобактерии, поскольку их встречаемость составляла 87% (Кузякина, Ефимова, 2014). Сообщалось, что представители цианобактерий могут быть использованы в качестве источника пищевого и кормового белка, биосорбентов, ферментов и других биологически активных веществ (Ефимова, Кузякина, 2004). В настоящее время на Камчатке производится строительство парка «Три вулкана», в связи с чем предполагается активное использование гидротерм, расположенных на территории Мутновского геотермального месторождения, в бальнеологических целях.

Цель исследования – определить видовой состав микроводорослей Мутновского геотермального месторождения и их бальнеологический потенциал.

Материалы и методы

В ходе полевых работ в августе 2023 г. на Мутновском геотермальном месторождении (Лаборатория тепломассопереноса ИВиС ДВО РАН) были собраны образцы микроводорослей с субстратом на Верхне-Мутновском термальном поле, Пиратовских источниках и из озера Утиног. В районе мест сбора были проведены физико-химические измерения среды (Т, рН). Образцы исследовали в лабораторных условиях СКИНО НОЦ ЭП КамчатГТУ с помощью микроскопа *Olympus BX53*.

Результаты

Верхне-Мутновское термальное поле. Субстратом исследуемых альгосообществ данного образца являются гидротермально преобразованные глины. Температура грунта в месте отбора достигала 100 °С. Видовое разнообразие обедненное. Обнаружены нитчатые и колониальные сине-зеленые водоросли родов *Phormidium* и *Chroococcidiopsis* (рис. 1, 2).



Рисунок 1 – Нитчатые сине-зеленые водоросли рода *Phormidium*

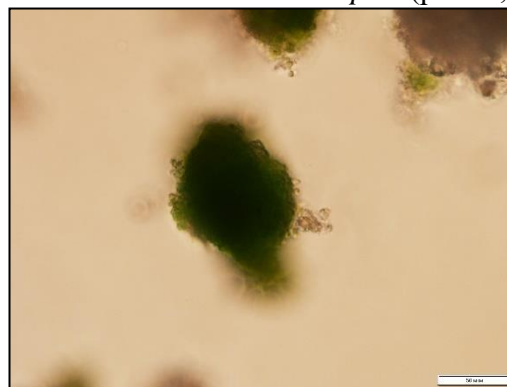


Рисунок 2 – Колониальные сине-зеленые водоросли *Chroococcidiopsis*

Пиратовские источники (Т – 16.0 °С, рН – 6.61). В данном образце доминирующими являются нитчатые сине-зеленые водоросли *Phormidium* sp. (рис. 3). Сопутствующие виды – пеннатные диатомовые водоросли, массовой является *Cymbella* sp. (рис. 4(a)).



Рисунок 3 – Нитчатые сине-зеленые водоросли рода *Phormidium*

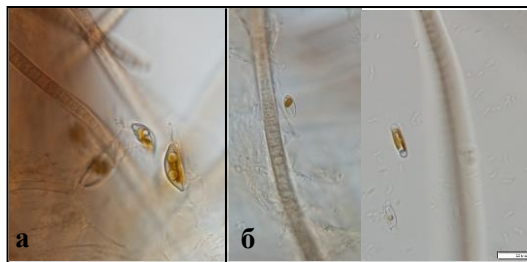


Рисунок 4 – Пеннатные диатомовые водоросли: *Symbella* sp. (а) и другие (б)

Озеро Утиное (Т – 32.6 °С, рН – 2.85). В образце найдены немногочисленные экземпляры пеннатных диатомовых водорослей (рис. 5). Также обнаружена одноклеточная *Cosmarium* sp. отдела *Chlorophyta* (рис. 6).

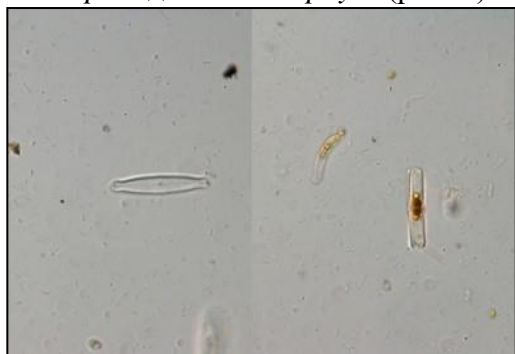


Рисунок 5 – Пеннатные диатомовые водоросли

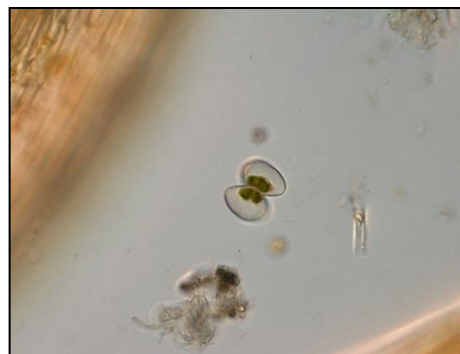


Рисунок 6 – Зеленая водоросль *Cosmarium* sp.

Заключение

В исследуемых образцах видовой состав альгоценозов достаточно обедненный. Альгосообщество Верхне-Мутновского термального поля представлено двумя видами сине-зеленых водорослей (*Phormidium* sp., *Chroococcidiopsis* sp.). В Пиратовских источниках преобладают нитчатые сине-зеленые водоросли рода *Phormidium*. Во всех, кроме образца с Верхне-Мутновского термального поля, были обнаружены пеннатные диатомовые водоросли. Для выявления бальнеологического потенциала района необходимо исследовать и другие гидротермальные проявления Мутновского месторождения.

Список литературы

1. Ефимова М.В. Технологические возможности культивирования цианобактерий рода *Phormidium* для биотехнологических целей / М.В. Ефимова, Т.И. Кузякина // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 1. С. 55.
2. Кузякина Т.И. Биологическое разнообразие цианопрокариот (синезеленых водорослей) горячих источников Центральной и Восточной Камчатки / Т.И. Кузякина, М.В. Ефимова // В мире научных открытий. 2014. № 12–1 (60). С. 272–293.
3. Listing the World's Algae [Электронный ресурс]: URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 20.08.2024).

Термогеодинамика литосферы и нефтегазоносность Кавказско-Каспийского и Карибско-Мексиканского регионов

В.Б. Свалова^{1,2}

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

²Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук
v-svalova@mail.ru

В связи с высокой степенью разведанности и выработанности запасов углеводородов, особенно нефти, в основных нефтегазоносных провинциях Российской Федерации, все более острой становится проблема прогнозирования и разведки новых месторождений на больших глубинах. В последние годы в Мексиканском заливе и бразильском секторе Атлантики обнаружены крупные месторождения нефти на глубинах до 10 км. Значительными ресурсами УВ обладает Каспийский регион (Волож и др., 2009; Леонов и др., 2015; Яценко и др., 2021). В связи с высокой разведанностью основных горизонтов до глубин 5 км в этом нефтедобывающем регионе большая часть ресурсов прогнозируется на больших глубинах (5-8 км). Высокий потенциал Прикаспийской провинции допускает вероятность обнаружения в ее пределах около двух десятков крупных (более 300 млн.т.) и нескольких уникальных месторождений. В этой связи большой интерес представляет сравнение геодинамической истории формирования и эволюции геологических и нефтегазоносных структур Альпийско-Гималайского пояса и Карибско-Мексиканского региона, в частности, Прикаспийской впадины и Мексиканского залива (Antipov et al., 1994).

Ключевые слова: Альпийский пояс, Карибский регион, Мексиканский залив, Прикаспийская впадина, мантийный диапир, тектоника плит, сейсмотомография

Thermogeodynamics of the lithosphere and oil and gas potential of the Caucasus-Caspian and Caribbean-Mexican regions

Valentina B. Svalova^{1,2}

¹Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS

²Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences

Due to the high degree of exploration and depletion of hydrocarbon reserves, especially oil, in the main oil and gas provinces of the Russian Federation, the problem of forecasting and exploration of new deposits at great depths is becoming increasingly acute. In recent years, large oil deposits have been discovered at depths of up to 10 km in the Gulf of Mexico and the Brazilian sector of the Atlantic. The Caspian region has significant hydrocarbon resources (Volozh et al., 2009; Leonov et al., 2015; Yashchenko et al., 2021). Due to the high exploration of the main horizons to depths of 5 km in this oil-producing region, most of the resources are predicted at greater depths (5-8 km). The high potential of the Caspian province allows for the possibility of discovering within its borders about two dozen large (more than 300 million tons) and several unique deposits. In this regard, it is of great interest to compare the geodynamic history of the formation and evolution of geological and oil and gas bearing structures of the Alpine-Himalayan belt and the Caribbean-Mexican region, in particular, the Caspian Basin and the Gulf of Mexico (Antipov et al., 1994).

Keywords: Alpine belt, Caribbean region, Gulf of Mexico, Caspian basin, mantle diapir, plate tectonics, seismic tomography

Альпийский пояс связан с коллизией континентальных плит (Аравийско-Африканской и Евразийской) (Гончаров и др., 2015; Свалова 2014, 2020, 2021; Svalova 2022; Шарков и др., 1989). Структуры Альпийского пояса включают задуговые бассейны, морские депрессии, осадочные бассейны, орогены. Моря и впадины характеризуются тонкой корой и преимущественно высоким тепловым потоком. Структуры характеризуются активным магматизмом и базальтовым вулканизмом с ксенолитами астеносферного вещества. Таким

образом, геолого-геофизические данные позволяют связать эти структуры с апвеллингом мантийных диапиров.

Средиземное море неоднократно открывалось и закрывалось из-за тектономагматической активизации, подъема масштабного мантийного плюма и раздвигания над ним плит, а затем, после исчерпания энергии плюма, закрытия океана Тетис и сближения литосферных плит в Альпийско-Гималайском поясе. Феномен гравитационной неустойчивости на поверхности глобального мантийного плюма проявляется в виде подъема отдельных мантийных диапиров более мелкого масштаба, ответственных за формирование морских впадин в западном секторе Альпийско-Гималайского пояса.

Согласно геодинамическим представлениям, на месте Большого Кавказа 35 млн. лет назад существовала глубоководная котловина шириной около 200 км. С постепенным смыканием его стороны сближались вплоть до полного столкновения около 11 миллионов лет назад, после чего область начала постоянное поднятие. При сжатии вещество литосферы образовало горный пояс с мощностью земной коры 45–50 км и мощностью литосферы до 250 км. Позднее, 5–10 млн. лет назад, Большой Кавказ начал быстро подниматься, и на его оси возникли вулканы Эльбрус, Казбек и др. По-видимому, это связано с подъемом астеносферы за счет сжатия и гравитационной неустойчивости.

Карибский регион расположен между Северной и Южной Америкой и может быть охарактеризован как совокупность континентальных, субконтинентальных, островных и океанических элементов. В настоящее время существует множество моделей строения и эволюции этого региона.

Исследования в этой области стали особенно актуальными в связи с тем, что в обрамлении Карибского моря, являющегося типичным внутриконтинентальным морем (рис. 1), сосредоточены многочисленные месторождения углеводородов (Куба, Венесуэла, Колумбия, Никарагуа, Тринидад).

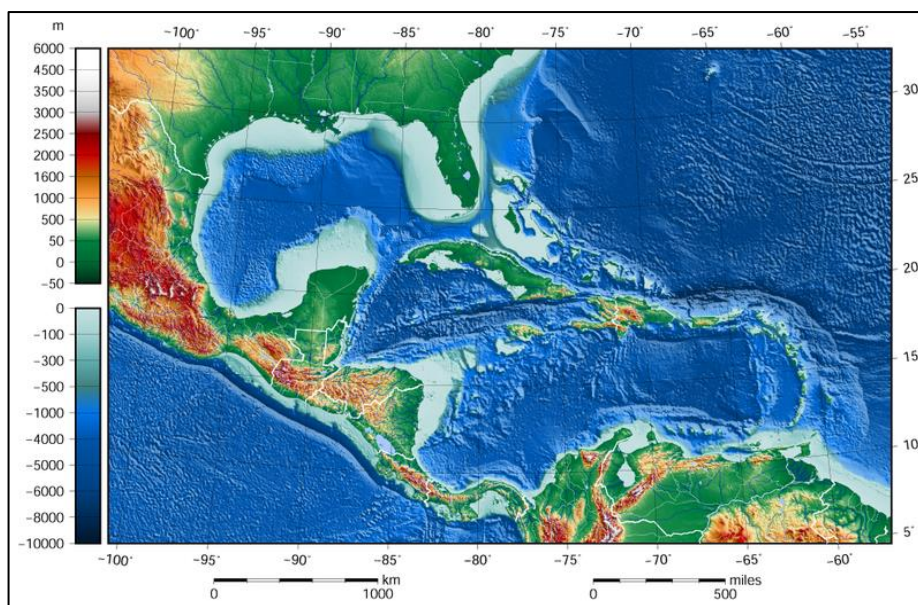


Рисунок 1 – Карта Карибско-Мексиканского региона (Wikipedia)

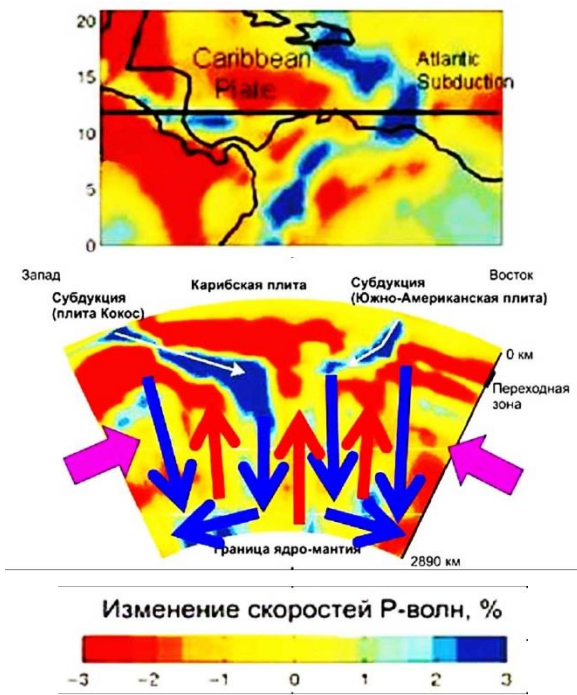


Рисунок 2 – Вариации скоростей продольных волн в мантии под Карибским регионом

Первоначальное раскрытие бассейна началось в предпозднеюрское время, когда в условиях растяжения литосферы в современное Карибское море проник крупный мантийный диапир. Это вызвало раскол (рифтинг) единого в то время континента, включавшего в себя как Америку, так и Африканский континент. Однако к началу мелового периода темпы дивергенции между (а) Северной и Южной Америкой и (б) Северной Америкой и Африкой были одинаковыми, тогда как к настоящему времени Африка удалена от обеих Америк из-за раздвига Атлантического океана. Это различие обусловлено однонаправленным характером Атлантического спрединга, тогда как дивергенция между Америками завершилась в меловом периоде и перешла в конвергенцию в кайнозое. Данные спутниковой геодезии предполагают наличие современной субмеридиональной

(северной) составляющей движения Южной Америки, Африки и Антарктиды, в то время как данные сети GPS показывают конвергенцию между Южной и Северной Америкой, что приводит к меридиональному сокращению Карибской плиты между ними. Тем не менее, несмотря на сближение двух Америк, мантийный диапир между ними отчетливо проявляется в скоростной структуре мантии под Карибским бассейном по данным сейсмической томографии (Van der Hilst et al., 1989) (рис. 2).

Карибский регион тесно связан с Мексиканским заливом, очень богатым нефтеносным бассейном (рис. 3, 4). Своеобразие тектонической эволюции Мексиканского залива дал Р. Баффлер, который предположил, что образование залива происходило в интервале 170–150 млн. лет назад в связи с развитием пассивной окраины Атлантического океана, т. е. в батско-титонское время, в процессе оттеснения Юкатанского континентального блока от южной окраины Северной Америки.

Можно сравнить развитие Мексиканского залива с Прикаспийской впадиной в связи с Альпийским поясом, когда импульсы мантийной активности сформировали новые осадочные бассейны. Как впадина Мексиканского залива старше впадин Карибского моря, так и Прикаспийская впадина старше Южно-Каспийской впадины и бассейнов Средиземноморья. Сравнительный анализ эволюции Альпийского пояса и Карибско-Мексиканского региона служит ключом для поиска глубоких месторождений в Прикаспийской впадине.

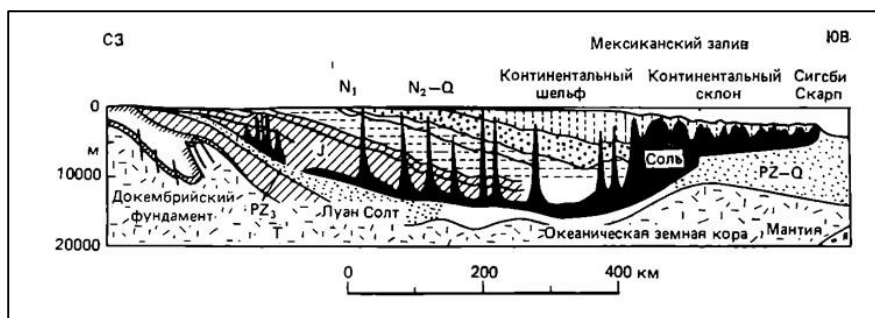


Рисунок 3 – Геологический разрез южной части Североамериканского континента с Мексиканским заливом (Геология нефти, 1968)

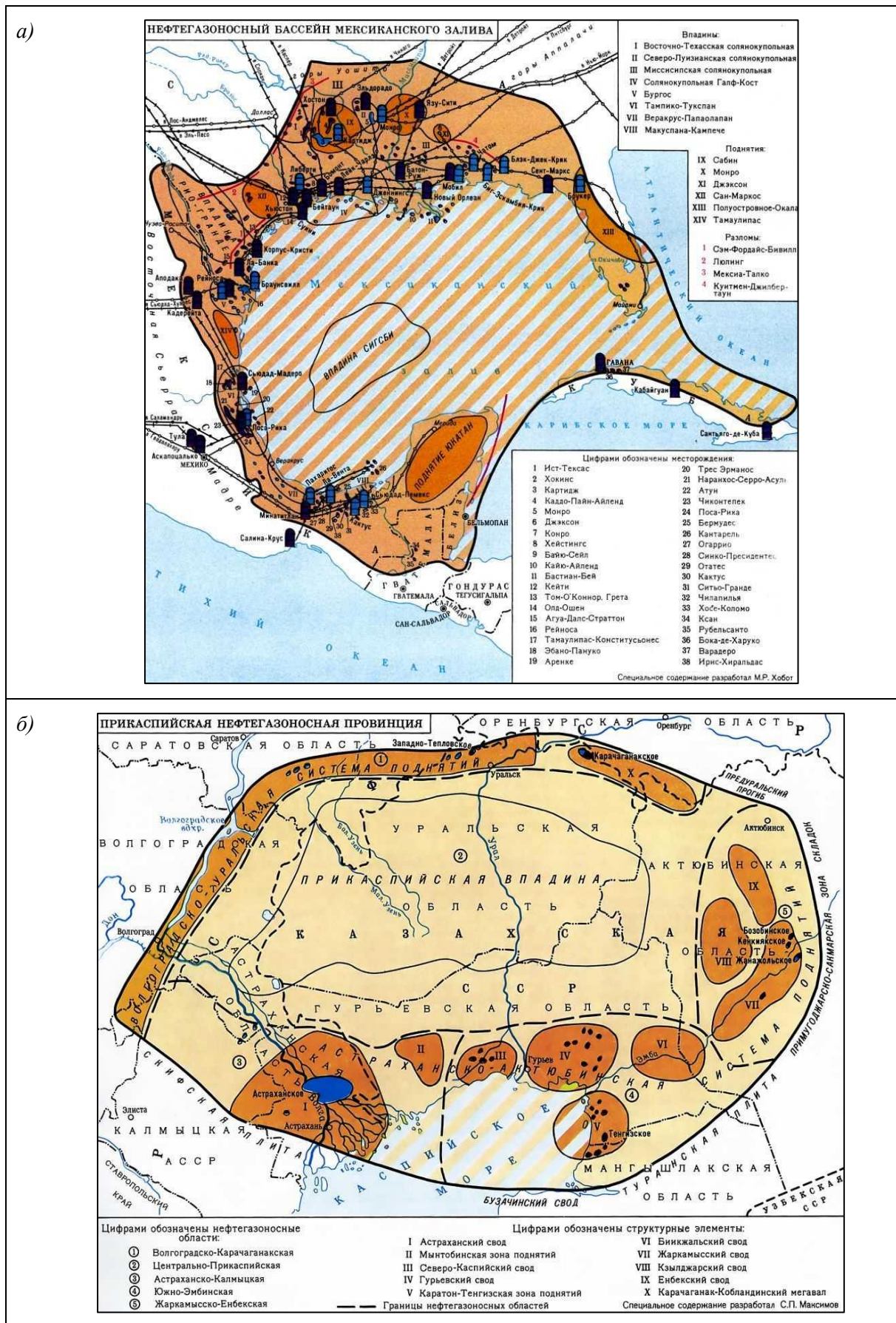


Рисунок 4 – (а) Нефтегазоносный бассейн Мексиканского залива. (Козловский и др., 1990)
 (б) Нефтегазовые месторождения Прикаспийской впадины (Максимов и др., 1990)

Список литературы

1. Волож Ю.А. О стратегии очередного этапа нефтепоисковых работ в Прикаспийской нефтегазоносной провинции / Ю.А. Волож, А.Н. Дмитриевский, Ю.Г. Леонов и др. // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 4. С. 341–362.
2. Геология нефти. Том 2 , книга 2 / Под редакцией И.В. Высоцкого. // М., Гостоптехиздат, 1968. 804 с.
3. Гончаров М.А. Вклад мантийного диапиризма в процесс формирования новообразованных впадин Средиземноморья и Карибского бассейна и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов / М.А. Гончаров, Н.В. Короновский, Ю.Н. Разницын, В.Б. Свалова // Геотектоника. 2015. № 6. С. 80–93.
4. Козловский Е.А. Минерально-сырьевые проблемы на рубеже XX и XXI веков / Е.А. Козловский, В.А. Евстрахин, В.А. Максимов // Горный журнал. 1990. № 4. С. 20–36.
5. Леонов Ю.Г. Нефть глубоких горизонтов осадочных бассейнов России и сопредельных стран / Ю.Г. Леонов, Ю.А. Волож, М.П. Антипов и др. // Мониторинг. Наука и технологии № 4(25), 2015. С. 6–15.
6. Максимов С.П. Геология нефти и газа Восточно-Европейской платформы. / С.П. Максимов, Г.Н. Дикенштейн, А.Н. Золотов, И.Н. Капустин, Л.Г. Кирюхин, А.А. Размышляев // М.: Недра, 1990. 274 с.
7. 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. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004.
8. Свалова В.Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование / В.Б. Свалова // Геология и геофизика Юга России. 2021. 11 (3). С. 76–92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.
9. Свалова В.Б. Механико-математическое моделирование формирования и эволюции геологических структур в связи с глубинным мантийным диапиризмом / В.Б. Свалова // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. № 3(20). С. 38–42.
10. Шарков Е.В. Внутриконтинентальные моря как результат задугового спрединга при коллизии континентальных плит / Е.В. Шарков, В.Б. Свалова // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 685–688.
11. Яценко И.Г. Особенности изменения физико-химических свойств нефтей в связи с большими глубинами / И.Г. Яценко, В.В. Крупицкий, Ю.М. Полищук // Георесурсы / Georesursy 2021. Т. 23. № 3. С. 99–108.
12. Antipov M.P. Structure of the Mexico deep-sea basin and its comparison with the Caspian syncline / M.P. Antipov, A.Ye. Shlezinger // Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections. 1994. V. 323. № 2. P. 66–71.
13. Svalova V. Geodynamics of Alpine belt and Caribbean region: Plate - tectonics and plume – tectonics / V. Svalova // Journal of Basic & Applied Sciences, 2022, Volume 18. P. 126–139.
- Van der Hilst R.D. Importance of the reference model in linearized tomography and images of subduction below the Caribbean plate / R.D. Van der Hilst, W. Spakman // Geophys. Res. Lett. 1989. 16, P. 1093–1096.

Особенности вторичных преобразований рифейских карбонатных отложений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции

Д.В. Писаренко, В.Б. Ершова

*Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет
daria.pisarenko1808@gmail.com*

В работе рассматриваются вторичные изменения рифейских карбонатных отложений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции. При помощи петрографических и катодолуминесцентных исследований, а также растровой электронной микроскопии были определены вторичные преобразования характерные для исследуемых пород, их влияние на коллекторские свойства, и установлена их связь с основными этапами геологического развития региона.

Ключевые слова: вторичные изменения, карбонатные породы, порода-коллектор, катодолуминесценция, Юрубчено-Тохомская зона нефтегазоаккумуляции (ЮТЗ)

Features of Secondary Transformations of Riphean Carbonate Deposits of Yurubcheno-Tokhoma Oil and Gas Accumulation Zone

Daria V. Pisarenko, Victoria B. Ershova

Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The paper deals with secondary changes in the Riphean carbonate deposits of the Yurubcheno-Tokhoma oil and gas accumulation zone. With the help of petrographic and cathodoluminescent studies, as well as scanning electron microscopy, secondary transformations characteristic of the studied rocks, their influence on reservoir properties were determined and their connection with the main stages of the geological development of the region was established.

Keywords: secondary changes, carbonate rocks, reservoir rock, cathodoluminescence, Yurubcheno-Tokhoma oil and gas accumulation zone (UTZ)

Общие сведения о геологическом строении района исследования

Юрубчено-Тохомская зона нефтегазоаккумуляции (ЮТЗ) расположена в западной части Сибирской платформы на Камовском своде Байкитской атеклизы. Месторождение открыто в 1982 году. Освоение началось в 2009 г. В пределах Юрубчено-Тохомской зоны основные промышленные скопления нефти и газа связаны с карбонатным комплексом рифея. Они приурочены к верхней части комплекса мощностью 200–300 м, залегающего под поверхностью крупного стратиграфического несогласия. Практически весь объем рифейского природного резервуара ЮТЗ является эффективным в связи с интенсивным развитием в нем трещинных и трещинно-каверновых типов коллекторов, а также крупных карстовых полостей, возникновение которых тесно связано с широким развитием палеокарста во время продолжительного перерыва в осадконакоплении между рифеем и вендом (*Багринцева, 1999*). ЮТЗ имеет сложное блоковое строение рифейского комплекса, осложненного серией дизъюнктивных нарушений (*Сауткин, 2015*).

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили 19 образцов керна скважины N, которая была пробурена на территории Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции и вскрыла предположительно разрез юрубченской свиты вблизи поверхности предвендского несогласия и данные по пористости и проницаемости для анализа ФЕС.

Для изучения особенностей вторичных преобразований рифейских карбонатных отложений ЮТЗ был применен ряд методов: петрографические исследования,

катодоллюминесцентные исследования, стадийный анализ и интерпретация фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС).

Результаты исследований

В результате петрографических исследований было выделено 2 литотипа карбонатных пород: кристаллические доломиты и доломитовые брекчии. Кристаллические доломиты развиты в монолитных участках скважины. Структура пород крупнотонкокристаллическая, неравномернокристаллическая. Текстура пород массивная. Кристаллы доломита образуют плотную мозаичную непористую структуру. Большинство пор, трещин и каверн были залечены кварцем и халцедоном. Заполнение пустот кремнеземом происходило в несколько этапов. Доломитовые брекчии развиты в карстовых участках скважины. Представлены в основном не окатанными окремненными обломками в доломитовом цементе. Эти породы на 60–70% сложены микро-тонкокристаллическим доломитом, 30–40% составляют окремненные обломки, которые включают в себя кристаллы халцедона и кварца, до 20% в микропустотах может содержаться органическое вещество.

При помощи катодоллюминесцентных исследований были выявлены 2 генерации доломита. Первая генерация представлена доломитом D1. Он характеризуется кристаллами с неровными краями и незональным катодоллюминесцентным свечением, проявляет либо красный, либо оранжевый цвета КЛ. Размер кристаллов доломита доходит до 250 мкм, чаще всего 70–100 мкм. Иногда можно наблюдать идиоморфные ромбоэдрические кристаллы, но, как правило, он представлен в виде массивных непористых масс. Вторая генерация представлена доломитом D2, который заполняет трещины, микрокаверны и пустоты. Этот доломит характеризуется кристаллами с ровными прямыми границами и часто с зональным катодоллюминесцентным свечением. Цвета КЛ красные или оранжевые, количество зон от 3 до 7. Кристаллы от мелко- до крупнокристаллических.

Далее были определены вторичные изменения и построена диаграмма их распределения по разрезу (рис. 1). После этого был проведен стадийный анализ. Он осуществлялся на основе принципов, описанных в работах О.В. Япаскурта (*Япаскурт, 1995, 2008*). В результате анализа была установлена последовательность вторичных изменений в соответствии с этапами геологического развития территории (рис. 2).

На основе данных по пористости и проницаемости (табл.), и используя классификацию карбонатных коллекторов Бурлина (*Бурлин и др., 1991*), был сделан вывод, что перекристаллизованные доломиты, выделенные желтым цветом, относятся к карбонатам с малой емкостью и эффективной пористостью меньше 5% и не представляют интереса как породы-коллекторы. Образцы, выделенные голубым цветом в зоне карста, можно отнести к карбонатам со средней емкостью и эффективной пористостью от 15 до 5%. Также, если сопоставить диаграмму распределения вторичных изменений по разрезу (рис. 1) и данные по ФЕС (табл.), то можно определить влияние вторичных изменений на пустотное пространство. На увеличение пустотного пространства влияет процесс выщелачивания (карст). На уменьшение пустотного пространства – процессы перекристаллизации, образования доломита D2 и окремнения. Влияние на пустотное пространство процесса стилолитизации не установлено.

Соответственно, массивные перекристаллизованные доломиты изученной скважины не являются коллектором, а все потенциальные коллекторы расположены в зоне карста. Это позволяет сделать вывод, что одним из критериев для прогноза коллекторов в изученной зоне является выявление зон карстофикации и прослеживание их по площади на основе данных ГИС и сейсморазведки.

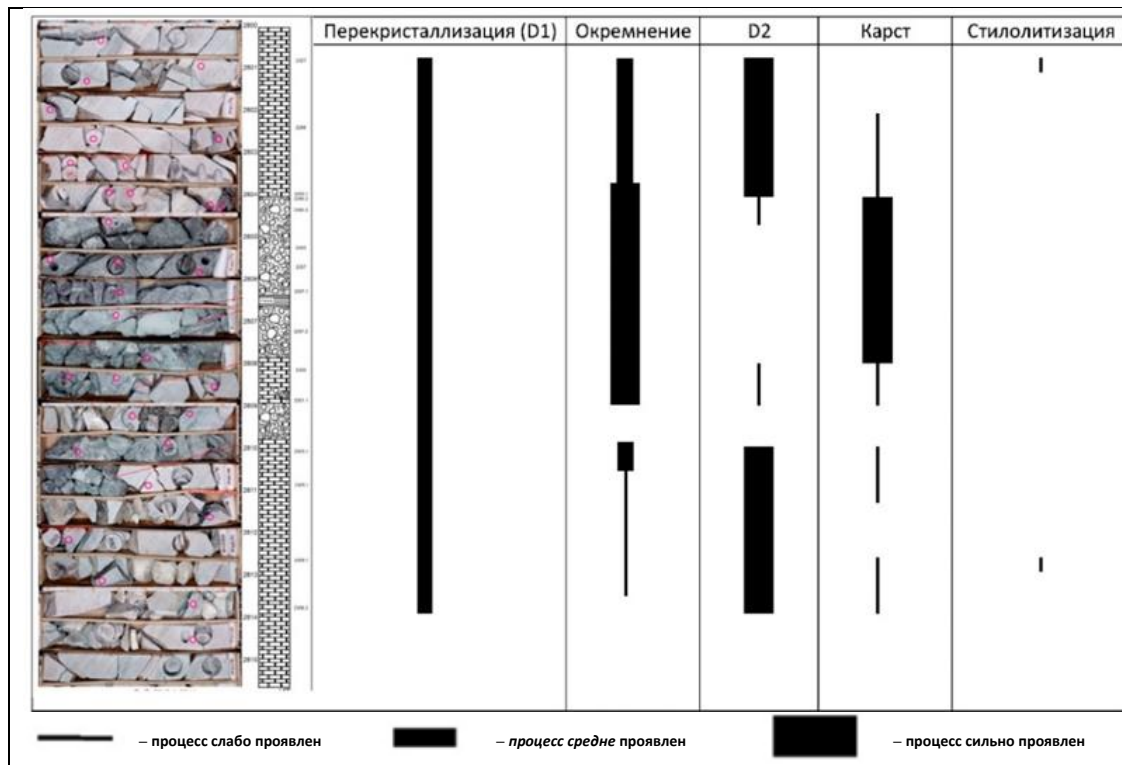


Рисунок 1 – Диаграмма распределения вторичных изменений по разрезу

Таблица. Фильтрационно-емкостные свойства (пористость определена пикнометрическим методом. Желтым цветом выделены участки монолитных доломитов, голубым – зона карста)

№ образца	Проницаемости, $\cdot 10^{-3}$ мкм ²			K _п ^{газ} пикн., %	Плотности, г/см ³	
	K _{пр} //	K _{пр} ¹	K _{пр} ²		ρ _{ас}	ρ _{мин}
2284-20//	0.00	0.00	0.00	0.15	2.79	2.80
2285-20//	0.00	0.00	0.00	0.09	2.80	2.81
2286-20//	0.00	0.00	0.00	0.02	2.79	2.79
2287-20//	0.00	0.00	0.00	0.01	2.78	2.78
2288-20//	24.34	96.79	192.65	0.12	2.78	2.78
2289-20//	187.57	556.01	0.00	0.78	2.73	2.75
2290-20//	0.00	0.00	0.00	0.06	2.79	2.79
2293-20//	2.42	2.68	0.77	11.48	2.37	2.68
2295-20//	1.28	1.24	4.42	10.92	2.33	2.62
2296-20//	0.58	1.09	0.45	9.09	2.42	2.66
2297-20//	0.12	0.20	0.10	8.89	2.44	2.68
2300-20//	0.00	0.00	0.00	0.16	2.78	2.78
2301-20//	2.91	6.76	18.05	0.21	2.78	2.78
2302-20//	71.47	345.34	0.06	8.1	2.52	2.75
2304-20//	0.00	0.00	0.00	0.03	2.85	2.85
2305-20//	0.00	0.00	0.00	0.21	2.85	2.86
2306-20//	6.73	3.56	0.00	5.07	2.72	2.87
2307-20//	0.00	0.00	0.00	0.07	2.85	2.85
2308-20//	0.00	0.00	0.00	0.02	2.83	2.83
2309-20//	0.11	0.34	0.00	0.12	2.84	2.85
2310-20//	0.00	0.00	0.00	0.12	2.84	2.85

Изучение порового пространства в карбонатных коллекторах различными методами

М.О. Гершман, В.Б. Ершова

*Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет
milena.gershman@yandex.ru*

В работе рассматриваются различные методы изучения порового пространства, в том числе и метод конфокальной лазерно-сканирующей микроскопии. При помощи растрового электронного, конфокального лазерно-сканирующего микроскопа и рентгеновского микротомографа были определены типы пор и их взаимное расположение в породе.

Ключевые слова: пористость, карбонатные породы, порода-коллектор, конфокальная лазерно-сканирующая микроскопия, рентгеновская микротомография

Study of pore space in carbonate reservoirs by different methods

Milena O. Gershman, Victoria B. Ershova

Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Various methods of studying pore space, including the confocal laser-scanning microscope method, are considered in this paper. By means of scanning electron, confocal laser-scanning microscope and X-ray microtomograph the types of pores and their mutual location in the rock were determined.

Keywords: porosity, carbonate rocks, reservoir rock, confocal laser-scanning microscopy, X-ray microtomography

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили 5 шлифов и 2 каменных образца. Для изучения особенностей порового пространства был применен ряд методов: петрографические исследования на поляризационном микроскопе, катодоллюминесцентные исследования (*Инструкция, 2012*), исследования на растровом электронном микроскопе и на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе, а также на рентгеновском микротомографе.

Результаты исследований

В ходе проведенных исследований шлифов на петрографическом микроскопе были получены размеры и морфология матрикса, поровых пространств и трещин.

Благодаря исследованиям на растровом электронном микроскопе был подтвержден химический состав основных масс, включений и заполнений пор и трещин. Подтвержден состав был с помощью спектров (*Багринцева, 1977*).

Более того, с помощью РЭМ также была описана морфология и распределение пор и систем микротрещин (*Багринцева, 1999*).

С помощью исследований на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе было сделано предположение о наличии УВ в некоторых образцах по стенкам пор (более яркое свечение) – СП-19а, СП-32, 36640-21 (рис. 1, 2). Более того, были обнаружены включения с неразличимым по составу свечением, однако эти данные также могут служить индикатором о наличии УВ.

В ходе рентгеновской микротомографии были получены показательные 3D модели образцов СП-19а и СП-32. На моделях отчетливо видно распределение пор в породе и их взаимосвязь.

Более того, в ходе рентгеновской микротомографии были получены процентные содержания пустотных пространств в образцах. Они приведены в табл. 1.

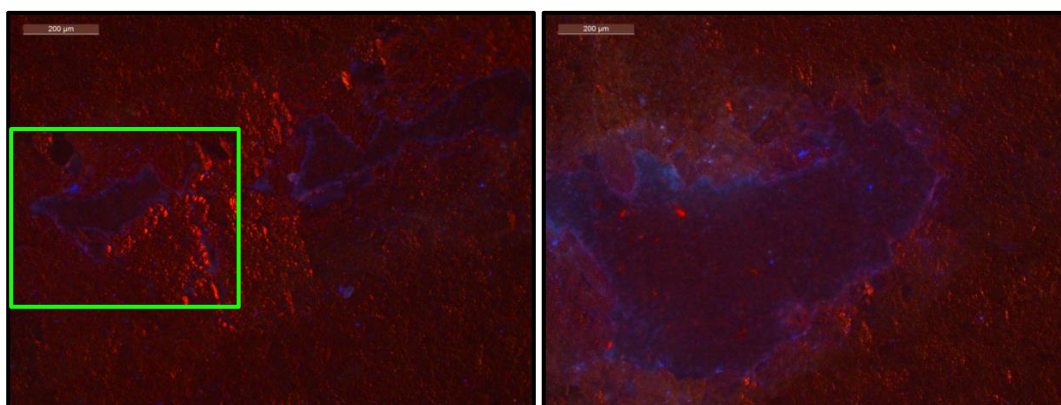


Рисунок 1 – Поровое пространство в образце СП-19а

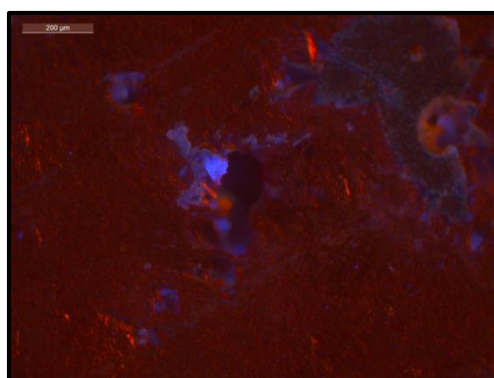


Рисунок 2 – Поровые пустоты в образце СП-32

Таблица 1. Пористость СП-19а и СП-32, полученная в ходе микротомографии

Образец	Пористость, %		
	Открытые поры (m_0)	Закрытые поры	Общая (K_n)
СП-19а	13.07	1.3	14.19
СП-32	10.06	0.34	10.40

Полученные данные являются основным параметром для изучения карбонатных коллекторов. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сводная таблица

Образец	Тип пористости	Тип пор (по размеру)	Характеристика трещин	K_n , %	m_0 , %
СП-19а	Трещинный	Микропоры, малые мезопоры	Частичное заполнение, очень широкие, постоянная выдержанность, расщепляющиеся, хаотические	14.19	13.07
СП-32	Пустотный с микротрещинами	Малые и большие мезопоры	Полное заполнение, узкие, постоянная выдержанность, извилистые, хаотические, пересекающиеся	10.40	10.06
34640-21	Каналовый	Микропоры, малые и большие мезопоры	Частичное заполнение, широкие, резко изменчивая выдержанность, извилистые, хаотические		
34564-21	Каналовый	Малые и большие мезопоры	Частичное заполнение, узкие, резко изменчивая выдержанность, извилистые, хаотические, параллельные		
34846-21	Трещинно-каналовый	Микропоры	Частичного и полного заполнения, очень широкие и макротрещины, резко изменчивая выдержанность, прямые, пересекающиеся		

Выводы

На основании 4 методов были определены типы пор и трещин;

При помощи катодоллюминесцентных исследований были выделены 2 генерации доломита, сформировавшиеся на различных этапах геологического развития региона (*Жемчугова, 2014*);

Была установлена связь в расположении пор, а также установлен порядок седиментационных преобразований;

Установлена связь постседиментационных преобразований с основными этапами (*Багринцева, 1999*).

Список литературы

1. *Багринцева К.Я.* Карбонатные породы – коллекторы нефти и газа. М., Недра, 1977. 231 с.
2. *Багринцева К.И.* Условия формирования и свойства карбонатных коллекторов нефти и газа. 1999. Москва.
3. *Багринцева К.И.* Роль трещин в развитии сложных типов коллекторов и фильтрации флюидов в природных резервуарах. / *К.И. Багринцева, Г.В. Чилингар* // Геология нефти и газа, 2007. С. 28–37.
4. *Жемчугова В.А.* Резервуарная седиментология карбонатных отложений, ООО "ЕАГЕ. ed. Москва. 2014.
5. Инструкция по эксплуатации системного микроскопа ВХ-53. 2012.

УДК 550.461+553.7.031.5

Вынос растворимых сульфатов с термальных полей Мутновского геотермального месторождения

А.В. Сергеева, А.В. Кирюхин, Л.А. Позолотина, М.А. Назарова, А.А. Кузьмина, Е.В. Карташева

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
anastavalers@gmail.com*

В работе исследован состав вод в ручьях, дренирующих термальные поля Мутновского геотермального месторождения: Северо-Западного Мутновского, Верхне-Мутновского термального поля и Дачных термальных источников. Были взяты пробы воды в верхней и нижней частях термального поля для выяснения вопроса о составе соединений, выносимых с термоаномалий. Термальные поля покрыты толщами глин, на прогретых поверхностях в сухую погоду кристаллизуются соли, которые могут претерпевать циклы растворения-кристаллизации, а также поступать в водотоки и в дальнейшем в акваторию. Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения поступления растворимых солей термальных полей в акваторию и в продуктивный резервуар, так как уже небольшое проникновение поверхностных сульфатных вод в неглубокие продуктивные резервуары вызывает изменение минералообразующих процессов и искажение показаний геотермометров, что затрудняет мониторинг состояния геотермальных систем. Обнаружено, что с термальных полей выносятся сульфаты аммония, алюминия, железа, кальция и др. Обсуждается солевой состав термальных вод, их потенциальное влияние на состояние продуктивного резервуара и его мониторинговые параметры.

Ключевые слова: геотермальные системы, термальные воды, продуктивный резервуар, Камчатка, термальные поля, сульфатные воды

Removal of soluble sulfates from thermal fields of the Mutnovsky geothermal field

Anastasia V. Sergeeva, Alexey V. Kiryukhin, Liliya A. Pozolotina, Maria A. Nazarova, Anna A. Kuzmina, Elena V. Kartasheva

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

The work studies the composition of waters in streams draining the thermal fields of the Mutnovsky geothermal field: the North-West Mutnovsky, Verkhne-Mutnovsky thermal field and Dachnye thermal springs. Water samples were taken in the upper and lower parts of the thermal field to clarify the composition of compounds carried out from thermal anomalies. Thermal fields are covered with clay layers; salts crystallize on heated surfaces in dry weather; these salts can undergo dissolution-crystallization cycles and enter watercourses and then the water area. The relevance of the work is due to the need to study the flow of soluble salts from thermal fields into the water area and into the productive reservoir, since even a small infiltration of surface sulfate waters into shallow productive reservoirs causes a change in mineral-forming processes and distortion of the measurements of geothermometers, which complicates monitoring the state of geothermal systems. It has been discovered that ammonium, aluminum, iron, calcium sulfates, etc. are removed from thermal fields. The salt composition of thermal waters, their potential impact on the state of the productive reservoir and its monitoring parameters are discussed.

Keywords: Geothermal systems, thermal waters, productive reservoir, Kamchatka, thermal fields, sulfate waters

Введение

Мутновская геотермальная система, приуроченная к Мутновскому вулкану, представляет интерес с точки зрения обеспечения населения Камчатского края энергией. Разгрузки глубинных флюидов системы происходят на термальных полях, которые представляют собой площадки с линейными размерами от нескольких десятков до сотен метров. В результате разгрузок, при контакте парогидротерм с вмещающими породами, формируются протяженные глинистые толщи (рис. 1), на поверхности которых обычно распространены минералы группы каолинита, алуниита и ярозита, в глубине преобладает монтмориллонит. Глинистые толщи пропитаны растворами солей, в основном это сульфаты натрия, калия, кальция, магния, аммония, алюминия, железа. В сухую погоду на поверхности прогретых грунтов кристаллизуются солевые выцветы, в составе которых в основном минералы группы квасцов, галотрихита, сульфаты алюминия, железа, кальция, аммония и др. Метеорные воды растворяют эти соли, и они частично могут попадать в водотоки, поскольку термальные поля обычно дренируются ручьями.

Вынос солей может привести к попаданию растворимых поверхностных сульфатов в прилегающую акваторию, не исключено частичное проникновение в продуктивные резервуары гидротермальных систем. Попадание поверхностных вод в продуктивный резервуар может приводить не только к охлаждению резервуара, но и к изменению химизма минералообразующих процессов. Обычно в зрелых гидротермальных системах воды щелочные хлоридные/гидрокарбонатные натриевые/кальциевые, в качестве вторичных минералов, с ними ассоциируются цеолиты. Если в этот резервуар поступают кислые растворы сульфатов алюминия, железа, кальция, то можно ожидать снижения рН и формирование монтмориллонита, который начинает контролировать соотношение натрия и калия в разгрузках, вследствие чего начинает казаться, что резервуар разогревается (*Сергеева и др., 2023*), а на самом деле в него поступают поверхностные сульфатные воды. Например, поступление сульфатных вод в продуктивный резервуар Долины Гейзеров, которое началось после повреждения верхнего водоупора из-за обвалов и селевых потоков, привело к кажущемуся повышению температуры в глубине системы (*Kiryukhin et al., 2023*). Поэтому в настоящей работе исследован вынос растворимых сульфатов с термальных полей Мутновского геотермального месторождения.

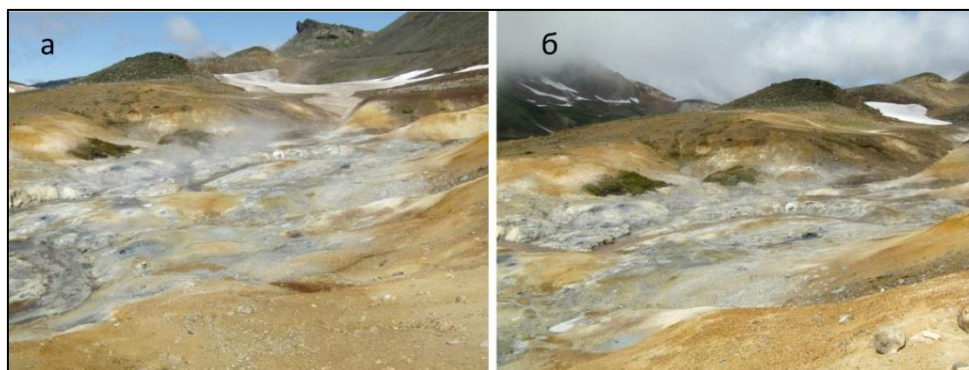


Рисунок 1 – Северо-Западное Мутновское термальное поле в августе 2023 (а) и 2024 (б) года

Материалы и методы

Исследованы Северо-Западное Мутновское, Верхне-Мутновское термальное поле и Дачные термальные источники. Дачные источники и Северо-Западное Мутновское термальное поле дренируется ручьями, протекающими практически в центре поля, а Верхне-Мутновское поле расположено на левом, крутом берегу ручья Рудный. Были отобраны образцы глинистых пород, солевых выцветов. Также были отобраны пробы воды из ручьев в самом начале термального поля, обычно со снежника, и в конце термального поля. Образцы воды были проанализированы для определения макроэлементного состава, был рассчитан солевой состав и проведено сравнение до и после термального поля.

Результаты и обсуждение

В табл. показан солевой состав растворов до и после термальных полей.

Таблица. Содержание солей и серной кислоты, пересчитанное из данных по составу вод в верхней и в нижней части термальных полей, мг/л

Соединение	СЗМ, верх	СЗМ, низ	ВхМут, верх	ВхМут, низ	Дч, верх	Дч, низ
H ₂ SO ₄	7.78	13.61				
Na ₂ SO ₄	0.96	3.00	17.70	17.78	1.97	2.07
K ₂ SO ₄			4.68		0.42	0.58
CaSO ₄	3.50	9.60			7.67	6.31
MgSO ₄		2.12	2.02	3.40	2.71	2.27
Al ₂ (SO ₄) ₃	1.78	2.47			0.41	1.52
(NH ₂) ₂ SO ₄	0.73	2.57				
NaHCO ₃			7.28			
Ca(HCO ₃) ₂			10.79	25.10		
KHCO ₃				2.53		
Минерализация	14.74	33.38	42.49	48.81	13.18	12.75

Примечание: СЗМ – Северо-Западное Мутновское термальное поле, ВхМут – Верхне-Мутновское термальное поле, Дч – Дачные термальные источники

Воды Северо-Западного Мутновского термального поля обогащаются серной кислотой, сульфатами натрия и кальция, магния, алюминия, аммония, существенно возрастает минерализация ручья. На термальном поле расположены выходы парогазовых струй, инкрустированные серой, грязеводные котлы, в составе глинистых грунтов визуальнo отмечаются кристаллы пирита, возможны и другие сульфиды. Многочисленные солевые выцветы располагаются на прогретых грунтах и представляют собой как свежие сульфаты, так и многократно подплавленные корочки. Понижение pH вод ручья на Северо-Западном термальном поле приводит к выщелачиванию ряда элементов, что и отражается на увеличении содержания ряда сульфатов, в том числе сульфата алюминия. Появление сульфата аммония может быть

следствием поступления с глубинными разгрузками, а может иметь биогенную природу (рис. 2), либо оба пути появления аммония вносят свой вклад в увеличение его содержания.



Рисунок 2 – Сине-зеленые водоросли на каолинит-натро/аммоний-алунитовой подложке, в контакте с гидролизованнами сульфатами железа (III), чермизитом, аммониярозитом, Северо-Западное термальное поле

Верхне-Мутновское термальное поле имеет довольно крутой рельеф, вследствие чего среди его термопроявлений распространены прогретые грунты и парогазовые струи, в то время как грязеводные котлы обычно тяготеют к выположенным участкам. Опробованный ручей Рудный после этого термального поля обогащается гидрокарбонатом кальция и сульфатом магния. Так как само термальное поле покрыто сульфатами алюминия, железа и пр., которые способствуют более кислой среде растворов, появление гидрокарбонатов может быть связано с неучтенной разгрузкой гидрокарбонатных вод с повышенным содержанием магния и калия. Влияние же самого термального поля на состав вод ручья, протекающего мимо Верхне-Мутновского термопроявления, требует дальнейшего уточнения.

Воды Дачных термальных источников обогащаются сульфатом алюминия, видимо, вследствие растворения солевых выцветов, выщелачивания алюминия парогидротермами с последующим выносом на поверхность. Щелочные термы, равно как и кислые, хорошо выщелачивают алюминий из пород вследствие его амфотерности. А вот содержание сульфата кальция понижается, возможно, в связи с его выделением в виде минеральных отложений, либо в связи с разбавлением.

Заключение

Дренаж термальных полей приводит к обогащению вод ручьев солями, которые обычно входят в состав солевых выцветов прогретых грунтов: сульфатами алюминия, аммония, магния, натрия, кальция и др. Происходит понижение рН, воды становятся более кислыми, агрессивными по отношению к вмещающим породам. Обогащение термальных ручьев рядом элементов обусловлено поступлением веществ на поверхность с глубинными термами, выщелачиванием из пород при понижении рН, растворением солевых выцветов. Понижение рН обусловлено гидролитическими равновесиями с участием солей алюминия и железа (III), окислением соединений серы с конечным образованием серной кислоты. Попадание поверхностных сульфатов в продуктивный резервуар может привести к его подкислению, смене доминирующих минералообразующих процессов, появлению монтмориллонита и искажению показаний классического геотермометра, который рассчитан для полевых шпатов и более подходит для каркасных силикатов в целом. Учет влияния поверхностных сульфатов позволит точнее оценивать состояние продуктивного резервуара.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 23-27-00127

Список литературы

1. *Сергеева А.В.* Влияние вторичного минералообразования на показания Na-K-геотермометра на примере гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий Заповедник, Камчатка) / *А.В. Сергеева, А.В. Кирюхин, О.О. Усачева, Т.В. Рычкова, Е.В. Карташева, М.А. Назарова, А.А. Кузьмина* // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 526–540.
2. *Kiryukhin A.V.* Modeling of the thermal-hydrodynamic and chemical regime of Geyser reservoir (Valley of Geysers, Kamchatka) / *A.V. Kiryukhin, A.V. Sergeeva, O.O. Usacheva* // Geothermics. 2023. Т. 115. P. 102808.

Условия формирования пластовых вод сеноманских отложений Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения Западной Сибири

А.Г. Плавник¹, Ю.И. Сальникова^{1,2}

¹ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук Западно-Сибирский филиал, г. Тюмень, Россия*

² *Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия
salnikova.julja@rambler.ru*

Проанализированы геохимические данные за весь период исследований пластовых вод сеномана на Тазовском месторождении Западной Сибири. Выявлена схожесть условий формирования подземных вод сеноманских отложений на территории Тазовского месторождения и сопредельных площадей. Прослежена связь тектонического разлома, осложняющего восточный борт локальной структуры, с вертикальной миграцией вод из неокомского и юрского комплексов в сеноманский горизонт, повлиявшей на формирование законтурных вод газонефтяной залежи сеномана.

Ключевые слова: Западно-Сибирский мегабассейн, сеноманский горизонт, геохимия пластовых вод, внутриконтурные и законтурные воды

Conditions for the Formation of Formation Waters of the Cenomanian Deposits of the Tazovskoye Oil and Gas Condensate Field in Western Siberia

Andrey G. Plavnik¹, Yulia I. Salnikova^{1,2}

¹ *West Siberian Branch, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Petroleum
Geology and Geophysics. A.A. Trofimuk, Tyumen, Russia*

² *Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

Geochemical data for the entire period of research into Cenomanian formation waters at the Tazovskoye field in Western Siberia were analyzed. The similarity of the conditions for the formation of groundwater in Cenomanian deposits on the territory of the Tazovskoye field and adjacent areas was revealed. The connection between the tectonic fault, which complicates the eastern side of the local structure, and the vertical migration of water from the Neocomian and Jurassic complexes into the Cenomanian horizon, which influenced the formation of the boundary waters of the Cenomanian gas-oil deposit, was traced.

Keywords: West Siberian megabasin, Cenomanian horizon, geochemistry of formation waters, intra-circuit and peripheral waters

Введение

За последние годы в процессе разработки месторождений углеводородов появилась возможность проанализировать значительный объем гидрохимических исследований законтурных вод, попутных вод и вод, извлекаемых для обеспечения систем поддержания пластового давления нефтяных месторождений. Изучение и анализ геохимии подземных вод, по современным данным и материалам поисково-разведочных работ, позволяет детализировать условия формирования состава пластовых вод нефтегазоносных горизонтов Западно-Сибирского мегабассейна.

В этом отношении особый интерес представляет информация, накопленная на Тазовском месторождении, в том числе по пробам попутных вод, отобранных при эксплуатации сеноманской залежи до внедрения системы заводнения пласта (Плавник А.Г. и др., 2023; Сальникова Ю.И. и др., 2022). Такие данные позволяют оценить гидрогеохимические условия в нефтенасыщенной зоне пласта без внедрения вод из других объектов, сопоставить с региональными материалами и результатами анализов, полученных в процессе эксплуатации залежи с применением системы заводнения.

Материалы и метод исследования

К настоящему времени накоплен значительный объем результатов гидрогеохимических опробований (более 300 проб) апт-альб-сеноманского комплекса (ААС ВК), неокомского и юрского комплексов на Тазовском месторождении и прилегающих территориях (Плавник А.Г. и др., 2023; Сальникова Ю.И. и др., 2022). Непосредственно на Тазовском месторождении неокомский и юрский комплексы изучены достаточно и слабо анализов соответственно. Результаты исследования пластовых вод юрского и неокомского комплексов на Тазовском месторождении и на прилегающих территориях демонстрируют похожий состав. В большей степени гидрогеохимическим опробованием охарактеризован сеноманский горизонт (36 проб). Пластовые воды отложений альба и апта на данном месторождении не изучались.

При рассмотрении данных геохимии подземных вод Тазовского месторождения выделено два периода изучения сеноманского горизонта (начальный и современный). Авторами также выполнено деление анализов пластовых вод, отобранных из нефтенасыщенного интервала, и интервала, расположенного ниже уровня водонефтяного контакта (ВНК) сеноманской залежи.

Результаты

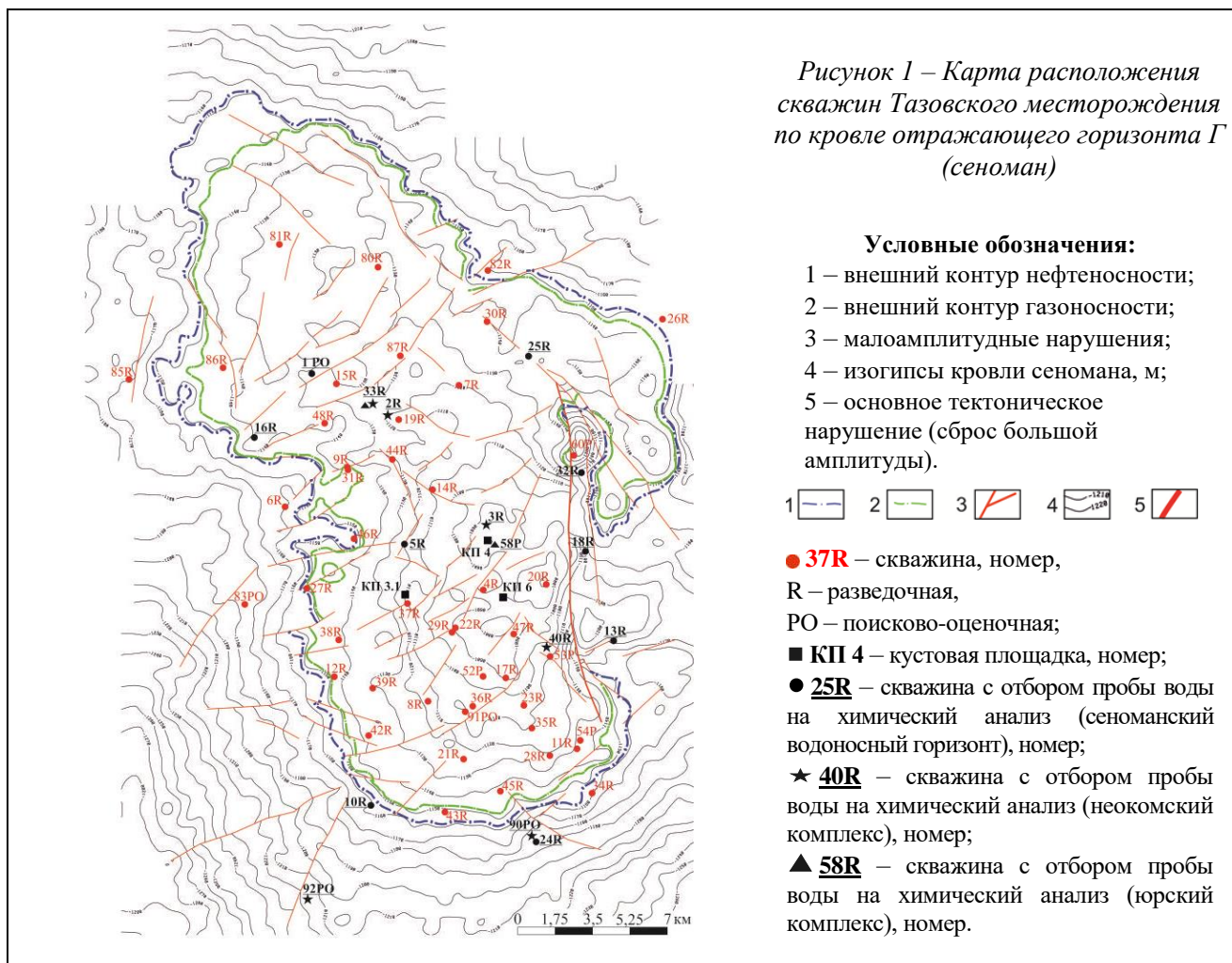
Подземные воды сеноманских отложений на Тазовском месторождении исследованы как на этапе поисково-разведочных работ (1964–1968 гг., 22 пробы), так и на современном этапе (2017–2023 гг., 14 проб) (табл.). Полученные данные свидетельствуют о близости результатов определения химического состава проб подземных вод, отобранных на разных этапах исследований. Преимущественно воды сеноманских отложений относятся к хлоридно-кальциевому типу. Исключение составляют пластовые воды в скважинах №№ 13R, 18R, 32R, отобранных на восточном склоне Тазовской структуры вдоль значительного по размерам и амплитуде разлома (рис. 1), где по результатам девяти анализов тип вод определен как хлоридно-магниевый и гидрокарбонатно-натриевый.

Таблица. Гидрогеохимическая характеристика пластовых вод сеноманского горизонта на Тазовском месторождении

Номер скважины, кустовой площадки	Кол-во проб/скважин	Год отбора	M, г/дм ³	Солевой состав, мг/дм ³						Микрокомпоненты, мг/дм ³			$\frac{rNa}{rCl}$	Тип вод*	
				Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Г ⁻	Br ⁻	B ⁺			
Начальный этап															
1P0, 5R, 16R, 25R	$\frac{9}{4}$	1964–1966	17.1	6181.3	344.3	83.0	23.0	10218.1	270.2	16.8	57.9	10.5	0.93	ХК	
10R, 24R	$\frac{4}{2}$	1965–1968	14.0	5117.3	230.3	71.4	17.0	8368.1	243.8	15.7	39.9	9.8	0.94	ХК	
13R, 18R, 32R	$\frac{9}{3}$	1964–1967	16.9	6245.3	107.0	95.4	9.2	9400.8	1083.7	14.3	46.1	9.0	1.03	ХМ, ГКН	
Современный этап															
КП 3.1, 4, 6, 7	$\frac{11}{9}$	2017–2022	16.4	5781.5	403.2	106.6	17.5	9553.7	391.5	10.6	34.9	9.3	0.92	ХК	
КП 2.3, 3.1, 7	$\frac{3}{3}$	2023	16.2	5649.6	356.1	159.9	35.3	9429.2	604.9	-	-	-	0.92	ХК	

*по В.А. Сулину (ХК – хлоридно-кальциевый, ХМ – хлоридно-магниевый, ГКН – гидрокарбонатно-натриевый)

	Пластовые воды в контуре ВНК
	Законтурные пластовые воды



Пластовые воды продуктивного интервала сеномана (11 анализов), отобранные из эксплуатационных скважин Тазовского месторождения до внедрения системы заводнения пласта (2017–2022 гг.), относятся к хлоридно-кальциевому типу. Средняя минерализация вод составляла $16,4 \text{ г/дм}^3$. По данным опробования разведочных скважин (1960-е годы) в пределах нефтенасыщенной части пласта на Тазовском месторождении пластовые воды (9 анализов) характеризуются близким значением средней минерализации – $17,1 \text{ г/дм}^3$ и имеют также хлоридно-кальциевый тип.

По новым геохимическим данным 2023 года (3 анализа), внутриконтурные воды сеноманской газонефтяной залежи сохраняют основной геохимический состав с минерализацией в среднем $16,2 \text{ г/дм}^3$ (в настоящее время ведется размещение излишков попутно добываемых вод под залежь).

Законтурные воды южной части сеноманской залежи, изученные по скв. 10R и 24R (две пробы), в целом характеризуются однотипным и схожим химическим составом с внутриконтурными водами и несколько пониженным значением минерализации (в среднем – $14,0 \text{ г/дм}^3$).

Наибольший интерес представляет геохимия законтурных вод сеномана, зафиксированная на восточном склоне Тазовской структуры, который отсечен глубоким тектоническим разломом с амплитудой до 120 м (рис. 2). Пластовые воды, по данным восьми анализов (скв. 13R, 18R), относятся к гидрокарбонатно-натриевому типу с минерализацией $14,4\text{--}19,3 \text{ г/дм}^3$ (Плавник А.Г. и др., 2023). Это может быть связано влиянием тектонического разлома, пронизывающего апт-альб-сеноманскую толщу. По единственной пробе из скв. 32R, пробуренной на расстоянии около 400 м от указанного разлома, тип законтурных сеноманских вод определяется как хлоридно-магниевый с минерализацией $17,6 \text{ г/дм}^3$. Законтурные воды

сеноманских отложений в восточной зоне структуры, очевидно, формировались под влиянием перетоков флюидов из юрского и неокомского комплексов через этот разлом.

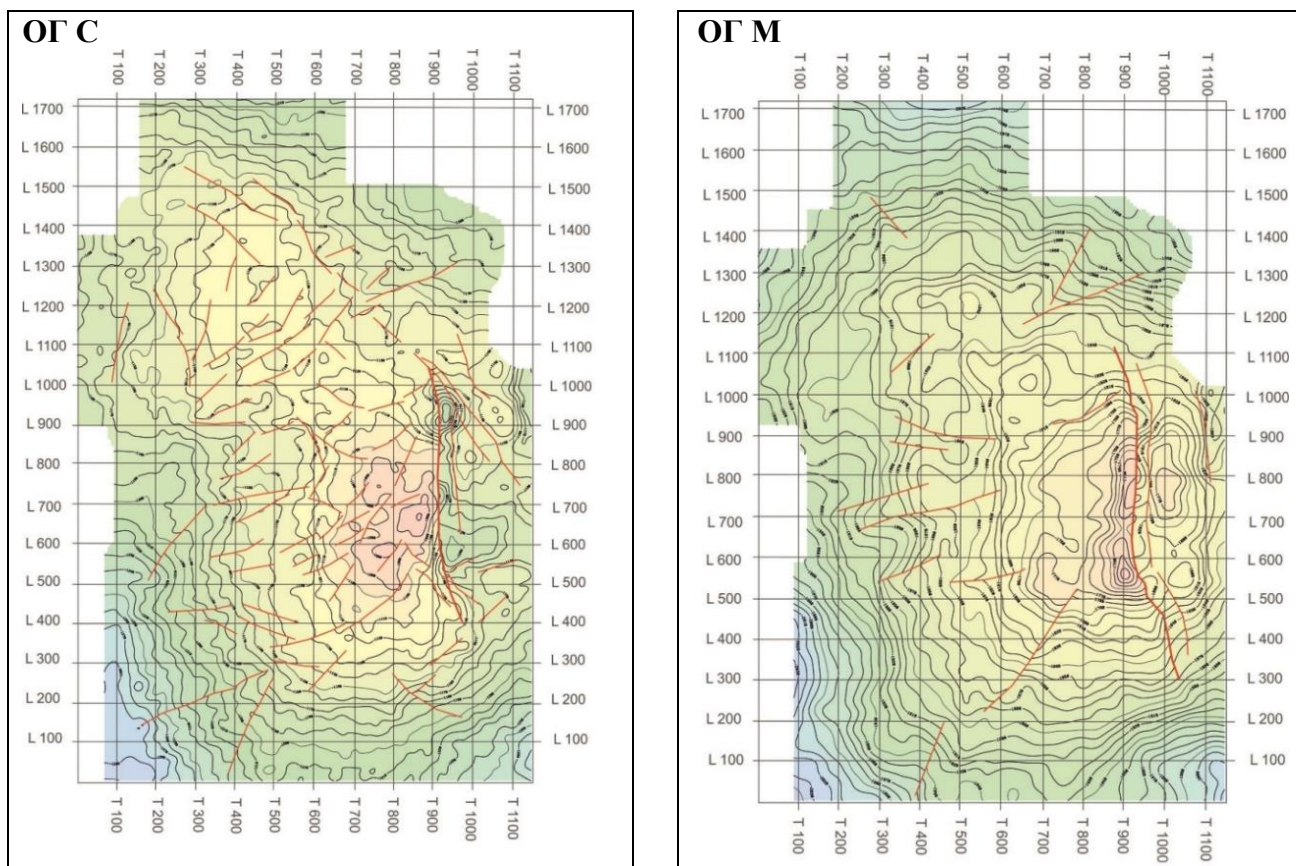


Рисунок 2 – Структурные карты Тазовского месторождения по кровле отражающего горизонта С (слева), по кровле отражающего горизонта М (справа)

Выводы

Результаты анализа глубоких подземных вод района Тазовского месторождения позволяют сделать следующие выводы:

1. Пластовые воды сеноманского горизонта на Тазовском месторождении по составу характеризуются единообразием с водами района исследований в целом, что свидетельствует о схожести условий формирования подземных вод на изучаемой территории.

2. Природа сеноманских вод Тазовского месторождения, приуроченных к восточному борту протяженного тектонического разлома, вероятно, связана с вертикальной миграцией вод из неокомского и юрского комплексов.

3. Мониторинг пластовых вод сеноманского горизонта, выполняемый в связи с размещением излишков попутно добываемых вод, позволит в перспективе своевременно отслеживать возможные изменения химического состава.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ №FWZZ-2022-0015 в рамках НИР СО РАН

Список литературы

1. Плавник А.Г. Гидрогеохимия юрско-меловых отложений Тазовского месторождения Западной Сибири и сопредельных территорий / А.Г. Плавник, В.А. Грибанов, Ю.И. Сальникова и др. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2024. № 1(385). С. 16–27.

2. Плавник А.Г. Гидрогеохимия сеноманских отложений района Тазовского месторождения / А.Г. Плавник, Ю.И. Сальникова // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 2, № 2. С. 191–196. DOI 10.33764/2618-981X-2023-2-2-191-196.

3. Сальникова Ю.И. Палеогидрогеохимия подземных вод юрских и меловых отложений Большехетской впадины / Ю.И. Сальникова, Р.Н. Абдрашитова // Научная территория: технологии и инновации : Материалы Международной научно-практической конференции, Тюмень, 17–18 ноября 2022 года / Отв. редактор В.А. Чейметова. Том I. Тюмень: Тюменский индустриальный университет. 2022. С. 57–62.

УДК 552.578:2.061.33 (571. 122)

К вопросу формирования маломинерализованных вод нефтегазоносных горизонтов Западно-Сибирского мегабассейна

Р.Н. Абдрашитова

*Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
abdrashitovarn@tyuiu.ru*

Особый тип вод, который можно отнести к маломинерализованным, является неотъемлемой частью гидрогеохимического облика нефтегазоносных горизонтов Западно-Сибирского мегабассейна. Речь идет о водах с минерализацией 2–6 г/дм³ в пределах юрских отложений (на глубинах порядка 2600–3300 м), относящихся к гидрокарбонатно-натриевому типу вод по В.А. Сулину. Исследователи в области нефтегазовой гидрогеологии придерживаются различных теорий образования маломинерализованных вод на глубинах нефтегазоносных горизонтов Западной Сибири: элизионной, теории разбавления захороненных седиментационных вод эндогенными, а также теории, основанной на представлении о процессе формирования углеводородных скоплений. Результаты анализа геологических условий Краснolenинской группы месторождений показали, что гидрогеохимический облик ниже-среднеюрского комплекса сформировался под влиянием поступления элизионных вод из вышележающих глинистых отложений и низкоминерализованных высокотемпературных глубинных флюидов, которые в совокупности и привели к формированию в районе исследований маломинерализованных вод.

Ключевые слова: минерализация подземных вод, нефтегазовая гидрогеология, Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн

On the Issue of the Formation of Low Mineralized Waters of Oil and Gas Bearing Horizons of the West Siberian Megabasin

Rimma N. Abdrashitova

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

A special type of water, which can be classified as Low Mineralised, is an integral part of the hydrogeochemical appearance of oil and gas bearing horizons of the West Siberian megabasin. These are waters with mineralisation of 2–6 g/dm³ within Jurassic sediments (at depths of about 2600–3300 m). These waters belong to the hydrocarbonate-sodium type of waters according to V.A. Sulin. Researchers in the field of oil and gas hydrogeology adhere to different theories of formation of Low Mineralised waters at depths of oil and gas bearing horizons of Western Siberia. The first theory is elision theory, the second theory is based on the idea of dilution of buried sedimentic waters by endogenous waters, the third theory is based on the idea of the process of formation of hydrocarbon accumulations. The results of the analysis of geological conditions of the Krasnoleninsk group of fields showed that the hydrogeochemical appearance of the Lower Middle Jurassic complex was formed under the influence of elision waters from the overlying clayey sediments and high temperature deep fluids, which together led to the formation of Low Mineralised waters in the study area.

Keywords: groundwater mineralization, petroleum hydrogeology, West Siberian oil and gas basin

Введение

Формирование подземных вод – главная теоретическая проблема современной гидрогеологии. Это двуединая проблема, которая подразделяется на две части: формирование воды как растворителя и формирование ее вещественного состава.

В случае маломинерализованных вод глубоких нефтегазоносных горизонтов решение проблемы формирования вещественного состава можно разделить на две части: 1) определение условий, при которых малая минерализация является показателем состава подземных вод, характеризующим и отражающим состав исходных водных растворов; 2) определение условий когда малая минерализация является следствием трансформации состава изначально более минерализованных вод.

Гидрогеохимическое поле мезозойского гидрогеологического бассейна Западно-Сибирского мегабассейна изучено достаточно хорошо (около 20000 анализов), но в то же время ряд вопросов остаётся нерешенным. Эти вопросы связаны с объяснением причин того что, изначально захороненные преимущественно морские воды в процессе геологического развития Западной Сибири приобрели современный облик со сложнопостроенной латеральной и вертикальной зональностью. Значительная часть этих вопросов связана с проблемой наличия маломинерализованных вод на глубинах более 1800–2000 м. Выяснение генезиса указанного типа вод, поиск механизмов трансформации подземных вод глубоких нефтегазоносных горизонтов (изначально более минерализованных) – это фундаментальная задача нефтегазовой гидрогеологии.

Актуальность настоящего исследования продиктована не только вопросами фундаментального характера, но прикладного. Результаты исследований ведущих ученых в области нефтегазовой гидрогеологии (А.А. Карцев, В.В. Колодий, М.И. Суббота, В.М. Матусевич и др.) свидетельствуют о генетической связи маломинерализованных вод с залежами углеводородов, в некоторых случаях наличие таких вод выступает как фактор, определяющий поведение водо-углеводородных систем. В связи с высокой химической активностью маломинерализованные воды (независимо от генезиса) являются «носителями» растворенного органического вещества, что в свою очередь может быть использовано как поисковый признак.

Маломинерализованные воды Красноленинской группы месторождений

С точки зрения формирования маломинерализованных вод район Красноленинской группы месторождений, расположенный в западной части Западно-Сибирского мегабассейна, представляет особый интерес, так как здесь в ниже-среднеюрском комплексе получили широкое распространение гидрокарбонатно-натриевые воды с низкой минерализацией (от 2-3 г/л). В целом, ниже-среднеюрский гидрогеологический комплекс Западно-Сибирского мегабассейна характеризуется региональным распространением хлоркальциевого типа подземных вод (по В.А. Сулину) (*Матусевич, 2005; Ставицкий и др. 2006*), на фоне которого выделяются азональные типы: гидрокарбонатно-натриевый, хлормагнийевый, сульфатно-натриевый и хлоркальциевый с пониженной минерализацией.

К основным особенностям геологического строения района исследований гидрогеологического комплекса относятся: наличие глин неокомского возраста мощностью 650–700 м; положение территории в зоне сопряжения систем разломов различной направленности вблизи к Уральскому обрамлению (*Матусевич и др., 2005*). В эпохи тектонических активизаций разломы за счет растяжения земной коры были «усилены» магматическими внедрениями; фиксируется масштабное аутигенное минералообразование в низах осадочного чехла.

А.Р. Курчиковым и Б.П. Ставицким отмечаются наиболее отличительные черты геотермического поля Красноленинской группы месторождений, главной из которых они считают – наличие очень жестких геотермических условий (*Курчиков, 1992*). Так, на глубине 1.4–1.5 км по Ем-Еговской, Ингинской, Пальяновской площадям установлены температуры от 60 до 70 °С, чего не наблюдается практически ни в одной другой части Западной Сибири.

Повышенные температуры фиксируются и в нижних частях разреза, на глубине 2.5 км они, как правило, выше 120 °С.

Учитывая особенности геологического строения территории, в районе исследований формирование маломинерализованных вод согласуется с геофлюидодинамической моделью сопряженного нисходяще-восходящего массопереноса. Общее описание данной модели опубликовано Л. А. Абуковой (*Абукова и др., 2007, 2021*). Также с точки зрения рассматриваемой проблемы интересна пульсационно – флюидогеотермодинамической модель формирования глубоких флюидов В. И. Дюнина (*Дюнин, 2000*). Мы предполагаем, что гидрогеохимический облик ниже-среднеюрского комплекса, характеризующийся наличием маломинерализованных вод, сформировался под влиянием поступления элизионных вод из глин фроловской свиты и низкоминерализованных высокотемпературных глубинных флюидов, которые в совокупности и привели к формированию вод с малой минерализацией. В предложенной модели присутствуют черты гипотез элизионного и эндогенного формирования маломинерализованных вод глубоких нефтегазоносных горизонтов (*Матусевич и др., 2005; Всеволожский и др., 2010*).

Фроловская свита послужила не только «источником» элизионных вод, но своего рода надежной «покрышкой», сохраняющей контрастную геогидродинамическую и геогидрохимическую обстановки в нижезалегающих отложениях.

Выводы

Формирование маломинерализованных воды ниже-среднеюрского гидрогеологического комплекса Красноленинской группы месторождений связано с разбавлением «захороненных» седиментационных вод элизионными водами и глубинными флюидами, вероятно периодически поступающих из фундамента. Оценить долю каждого вида вод – задача, требующая новых методологических подходов.

Список литературы

1. *Абукова Л.А.* Модели и механизмы нисходящей миграции УВ из осадочного чехла в приподнятые блоки фундамента / *Л.А. Абукова* // Нефтегазовая гидрогеология на современном этапе (теоретические проблемы, региональные модели, практические вопросы). Москва, 2007. С. 191–209.
2. *Абукова Л.А.* Флюидодинамика глубокопогруженных зон нефтегазонакопления осадочных бассейнов / *Л.А. Абукова, Ю.А. Волож* // Геология и геофизика. 2021. № 8. Том 62. С. 1069–1080.
3. *Всеволожский В.А.* Влияние глубинных газопаровых флюидов на формирование состава пластовых вод нефтегазовых месторождений / *В.А. Всеволожский, Т.А. Киреева* // Вестник Москов. Ун-та. Сер.4. Геология. 2010. № 3. С. 57–62.
4. *Дюнин В.И.* Гидродинамика глубоких горизонтов нефтегазоносных бассейнов / *В.И. Дюнин*. М. : Научный мир, 2000. 472 с.
5. *Курчиков А.Р.* Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности / *А.Р. Курчиков*. М.: Недра, 1992. - 231 с.
6. *Матусевич В.М.* Геофлюидальные системы и проблемы нефтегазоносности Западно-Сибирского мегабассейна / *В.М. Матусевич, А.В. Рыльков, И.Н. Ушатинский*. Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. 225 с.
7. *Ставицкий Б.П.* Вертикальная и латеральная гидрохимическая зональность, типизация подземных вод Западно-Сибирского бассейна / *Б.П. Ставицкий, А.Р. Курчиков, А.Г. Плавник* // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2006. № 5. С. 58–84.

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

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

УДК 551.23; 528.9

Формирование Веб-ГИС в качестве инструмента накопления, визуализации и анализа данных о геотермальных объектах Узон-Гейзерной кальдеры (Кроноцкий заповедник)

Е.С. Шитц

*ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник», Елизово, Россия
esshits@gmail.com*

В данной статье рассматривается применение геоинформационных систем в процессе изучения уникальных геотермальных объектов на территории Узон-Гейзерного района Кроноцкого государственного заповедника (Камчатский край). Описаны природные особенности Узон-Гейзерной кальдеры. Рассматривается внедрение такого инструмента как Веб-ГИС в процесс изучения, накопления и анализа данных о природных объектах и явлениях в пределах изучаемой местности.

Ключевые слова: геоинформационные системы, ГИС, Веб-ГИС, гейзеры, Кроноцкий заповедник, кальдера Узон, долина реки Гейзерной

Formation of Web-GIS as a Tool of Accumulation, Visualization and Data Analyzing of Geothermal Objects of the Uzon-Geyzernaya Caldera (Kronotsky Reserve)

Ekaterina S. Shitts

FSBI «Kronotsky state reserve», Elizovo, Russia

This article discusses the use of geographic information systems in the process of studying unique geothermal objects in the Uzon-Geyserny district of the Kronotsky State Nature Reserve (Kamchatka Krai). The natural features of the Uzon-Geyzernaya caldera are described. The introduction of such a tool as Web-GIS in the process of studying, accumulation and analyzing data on natural objects and phenomena within the study area is considered.

Keywords: geographic information systems, GIS, Web-GIS, geysers, Kronotsky Nature Reserve, Uzon caldera, Geyzernaya River valley

Введение

В настоящее время геоинформационное картографирование становится неотъемлемой частью исследований в области наук о Земле. Современные технологии позволяют вырабатывать новые, более совершенные алгоритмы, которые обеспечивают удобный, доступный формат создания, редактирования и накопления геоданных. Одной из основополагающих задач научного отдела Кроноцкого заповедника является обеспечение максимальной непрерывности исследований для формирования общей картины протекания различных природных процессов и явлений на особо охраняемой природной территории. Ежегодно формируемая и представляемая в качестве основного результата деятельности научных сотрудников заповедника, приглашенных специалистов книга «Летопись природы» являет собой незаменимый ресурс для получения общих кратких сведений о том, в каких

областях науки в заповеднике год за годом проводятся исследования. Но если говорить о возможности изучить, посмотреть исходные данные и оперативно поработать с ними – это довольно непросто и проблематично.

В 2024 году было принято решение попробовать создать для Кроноцкого заповедника Web-GIS – геоинформационная система в сети Интернет, которая будет служить для внутреннего пользования учреждения и помогать сотрудникам при выполнении рабочих задач. Для сотрудников научного отдела это открывает большие возможности относительно перспектив удобного хранения, визуализации и анализа данных об объектах исследования.

Объекты исследования

Геотермальные объекты на территории заповедника со дня своего открытия находятся под пристальным вниманием научного сообщества, поэтому накопление и анализ данных по данной теме представляет собой особо важную составляющую работы научного отдела. Район исследования – Узон-Гейзерная вулканотектоническая депрессия, являющаяся частью Восточно-Камчатского вулканического пояса. Депрессия включает в себя два всемирно известных природных объекта: Долину Гейзеров и кальдеру Узон, где как раз и расположены главные объекты изучения – гейзеры. Гейзерная гидротермальная система приурочена к восточной краевой части Узон-Гейзерной депрессии. После разрушения юго-восточного борта депрессии (9–12 тыс. лет назад) за счет эрозии долины реки начался интенсивный дренаж гидротермальной системы, вызвавший снижение давления в области ее разгрузки.

Особенность Узон-Гейзерной кальдеры, в особенности долины реки Гейзерной в их динамичности, подвижности из-за множества факторов. К этим факторам относятся: геологическая позиция (приуроченность Долины к борту Узон-Гейзерной кальдеры, наличие вложенных в кальдеру и прислоненных к ее борту озерных отложений), морфология склонов (преобладание крутых уступов, связанных с подмывом склонов реками и ручьями), присутствие многочисленных тектонических трещин, региональное искривление земной поверхности (по некоторым данным, поверхность в районе Верхне-Гейзерного термального поля поднимается на 4 см в год). Из-за совокупности и взаимосвязи этих факторов происходят катастрофические обвалы, оползни и селевые потоки (1982, 1985, 2007, 2014 гг.), инициированные гидротермальными и магматическими процессами (*Завадская и др., 2015*). Создание геоинформационной системы, включающей накопление, визуализацию и анализ данных о геотермальных объектах и катастрофических геологических процессах в Узон-Гейзерной кальдере – один из важных этапов на пути к формированию более глубокого понимания механизма гидротермальной деятельности, популяризации полученных знаний и обеспечению безопасности туристской инфраструктуры.

Исходные данные

В Долине Гейзеров с 2007 г. осуществляется непрерывный мониторинг гидрогеологического режима с целью выявления динамики изменений после катастрофического оползня 3.06.2007 и селя 3.01.2014 г на гейзерах Великан, Большой, устье р. Гейзерной, дискретное опробование одиннадцати основных режимных гейзеров и источников, а также непрерывный мониторинг цикличности гейзера Мутный (Шаман) в кальдере Узон (с 08.2012 г.) (*Откидач, 2024*). Сбор данных на протяжении многих лет осуществляется научными сотрудниками ИВиС ДВО РАН (*Kiryukhin et al, 2011, 2016, 2018, 2020, 2022, 2023*), в результате чего создан непрерывный ряд данных в Летописи природы Кроноцкого заповедника. Полученные результаты исследований легли в основу создания базы геоданных об изменениях режимов работы гейзеров.

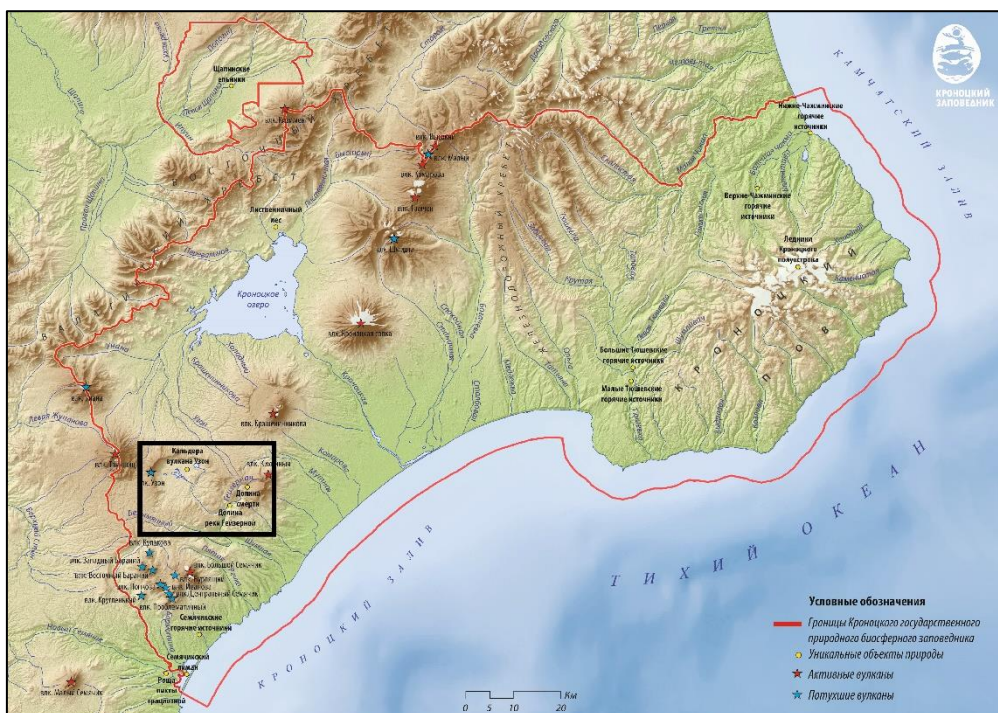


Рисунок 1 – Расположение района исследования на территории Кроноцкого заповедника

Методы исследования и программное обеспечение

Работа выполняется с помощью программного обеспечения NextGIS – компания разрабатывает программное обеспечение и предлагает решения для выполнения проектов с применением ГИС в самых различных отраслях. Для ООПТ компания NextGIS даже сформировала особый программный комплекс, учитывая особенности работы природоохранных учреждений. В данной работе использовались два продукта – настольное приложение NextGIS QGIS и серверная ГИС NextGIS Web.

Весь процесс работы с данными можно поделить на несколько этапов. Первоначально в программе NextGIS QGIS создавался векторный слой в формате шейп-файла, при его создании ключевой информацией была информация о точном местоположении того или иного гейзера. Часть гейзеров уже была оцифрована и находилась в цифровых архивах Кроноцкого заповедника; для некоторых гейзеров необходимо было получить информацию о координатах и добавить их в векторный слой.

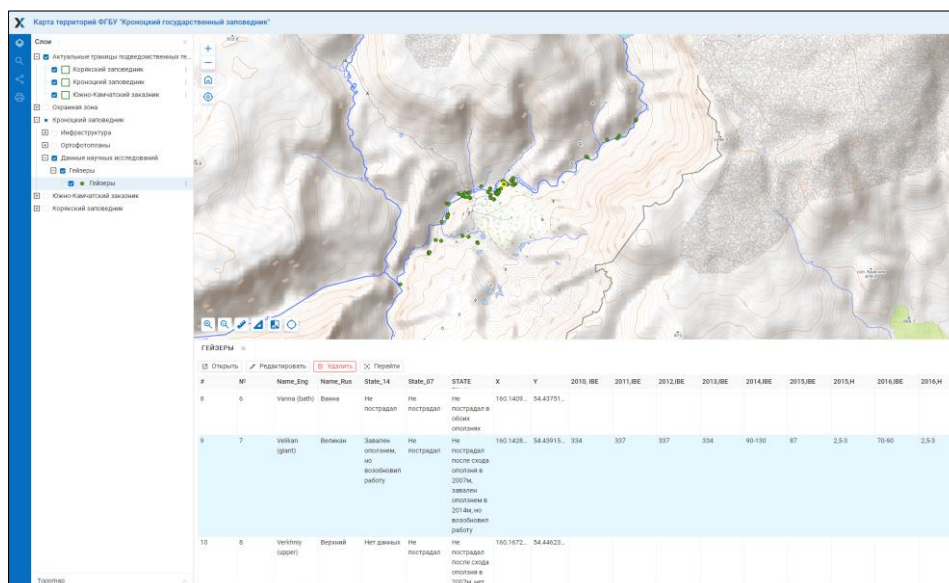


Рисунок 2 – Пример визуализации данных на платформе NextGIS Web

Следующим этапом стало создание атрибутивной таблицы с параметрами режима работы гейзеров по годам, начиная с 2010 года. Эти данные были взяты из Летописи природы Кроноцкого заповедника. Среди вносимых в таблицу параметров отражены: температура, средний расход воды, высота извержения и интервал между извержениями. Данные из настольного приложения NextGIS QGIS были экспортированы в серверную ГИС заповедника NextGIS Web, где был произведен ряд операций по добавлению слоя и настройкам отображения слоя с данными о гейзерах на веб-карте. На выходе мы получаем инструмент визуализации, изучения и анализа, а также редактирования данных.

Выводы

Проделанная работа по геотермальным объектам создала основу для дальнейших действий, в будущем планируется постоянное редактирование, обновление, добавление новых данных. Цифровизация, в том числе широкое внедрение ГИС с каждым днем все больше внедряются в работу природоохранных учреждений, и наша задача – формировать максимально удобное и комфортное для использования пространство цифровых данных для того, чтобы продолжать изучать и осуществлять охрану уникальных природных объектов.

Список литературы

1. *Завадская А.В.* Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / *А.В. Завадская* и др. // М. КРАСАНД, 2015. 88 с.
2. *Откидач М.С.* Летопись природы Кроноцкого заповедника В 2-х т. Т.1. / ред. *М.С. Откидач* / Елизово, 2024. 172 с.
3. *Kiryukhin A.V.* Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide / *A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, I.K. Dubrovskaya* // *Appl. Geochem. J.* 27, 2012. 1753–1766
4. *Kiryukhin A.* Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia)/ *A. Kiryukhin* // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2016. 323. P. 129-147.
5. *Kiryukhin A.* Geysers Valley CO₂ Cycling geological Engine (Kamchatka, Russia) / *A. Kiryukhin, V. Sugrobov, E. Sonnenthal* // *Geofluids Journal.* 2018. 1963618.
6. *Kiryukhin A.* A CO₂–Driven Gas Lift Mechanism in Geyser Cycling (Uzon Caldera, Kamchatka) / *A. Kiryukhin, G. Karpov* // *Geosciences* 2020. 10. 180. DOI: 10.3390/geosciences10050180
7. *Кирюхин А.В.* Моделирование условий формирования проницаемых каналов гейзеров в районах кислого вулканизма / *А.В. Кирюхин, Т.В. Рычкова, А.В. Сергеева* // *Вулканология и сейсмология.* 2020. № 2. С. 3–16.
8. *Поляков А.Ю., Кирюхин А.В.* Устройство для отбора неконденсированного газа из каналов гейзеров (выдан патент № 0195670 (RU 0195670 U1)).
9. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург : Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
10. *Kiryukhin A.V.* Dynamics of natural discharge of the hydrothermal system and geyser eruption regime in the Valley of Geysers, Kamchatka / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, N.B. Zhuravlev, N. Tsuchiya, T.V. Rychkova, O.O. Usacheva, I.K. Dubrovskaya* // *Applied Geochemistry.* 136, 2022. Article ID 105166.
11. *Kiryukhin A.V.* Modeling of the thermal-hydrodynamic and chemical regime of Geyser reservoir (Valley of Geysers, Kamchatka) / *A.V.Kiryukhin, A.V.Sergeeva, O.O.Usacheva* // *Geothermics.* 2023. Vol. 115. P. 102808.

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

CHAPTER VIII. PAPERS SUBMITTED FOR PUBLICATION ONLY

УДК 556.3+551.23

**Нижне-Менделеевский участок
геотермального месторождения Горячий Пляж на о. Кунашир:
результаты изучения и освоения**

С.В. Спектор¹, Р.В. Красников², К.В. Новиков², А.В. Платонова², Е.В. Попов²

¹*АО ГИДЭК, Москва, Россия*

info@hydec.ru

²*ФГБУ «Гидроспецеология», Москва, Россия*

info@specgeo.ru

Проведен анализ материалов опробования скважин и геофизических исследований месторождения Горячий пляж на о. Кунашир, а также опыта эксплуатации Нижне-Менделеевской ГеоЭС, расположенной на Нижне-Менделеевском участке. Дан анализ гидрогеотермических условий месторождения и их влияние на продуктивность скважин. Показано, что причиной снижения производительности скважин является, в том числе, недостаточная глубина вскрытия геотермального резервуара. На основании сопоставления геоэлектрических разрезов и геологического строения Дачного участка Мутновского месторождения и Нижне-Менделеевского участка месторождения Горячий пляж сделано предположение, что на Нижне-Менделеевском участке основные зоны притока геотермального флюида должны быть вскрыты на глубинах 1.5-2 км, где наблюдается возрастание кажущихся сопротивлений свыше 100 Ом·м.

Ключевые слова: геотермальное месторождение, Горячий пляж, о. Кунашир, Нижне-Менделеевская геотермальная электростанция, Менделеевская геотермальная система, вулкан Менделеева

**Nizhne-Mendelevsky Block of the Goryachy Plyazh Geothermal Field
on Kunashir Island: Results of Study and Development**

Sergey V. Spector¹, Ruslan V. Krasnikov², Konstantin V. Novikov², Alla V. Platonova², Evgeniy V. Popov²

¹*HYDEC Ltd, Moscow, Russia*

²*Federal State Budgetary Institution HYDROSPETS GEOLOGIYA, Moscow, Russia*

An analysis was conducted on well sampling materials and geophysical survey data from the Goryachiy Plyazh geothermal field on Kunashir Island, as well as operational experience from the Nizhne-Mendelevskaya Geothermal Power Plant located in the Nizhne-Mendelevsky Block. The hydrogeothermal conditions of the field and their impact on well productivity were analyzed. It was demonstrated that one of the reasons for the decrease in well productivity is insufficient penetration depth into the geothermal reservoir. Based on the comparison of geoelectric cross-sections and geological structures of the Dachny Block of the Mutnovsky field and the Nizhne-Mendelevsky Block of the Goryachiy Plyazh field, it was hypothesized that in the Nizhne-Mendelevsky sector, the main geothermal fluid inflow zones should be penetrated at depths of approximately 1.5-2 km, where an increase in apparent resistivity exceeding 100 Ohm·m is observed.

Keywords: geothermal field, Goryachiy Plyazh, Kunashir Island, Nizhne-Mendelevskaya Geothermal Power Plant, Mendelev geothermal system, Mendelev volcano

Введение

Геотермальное месторождение Горячий пляж расположено в центральной части острова Кунашир (Курильские острова), на северо-восточном склоне вулкана Менделеева, и является частью Менделеевской геотермальной системы (рис. 1). Месторождение выделено на основании исследований, проведенных в 1964–2004 гг. с целью разведки и оценки запасов теплоэнергетических вод для тепло- и электроснабжения поселков Южно-Курильск и Горячий пляж. На базе разведанных запасов пароводяной смеси на Нижне-Менделеевском участке месторождения построена и с 1993 г. по настоящее время функционирует Нижне-Менделеевская геотермальная электростанция (ГеоЭС). ГеоЭС оборудована современным энергетическим модулем бинарного действия, который рассчитан на выработку 7.4 МВт электрической мощности. В то же время, фактически вырабатываемая мощность ГеоЭС составляет всего 1.0–1.7 МВт. Дефицит мощности связан с постепенным снижением производительности и выходом из строя большей части эксплуатационных скважин. Выход эксплуатационных скважин из строя связан как с техническими причинами, так и с недостаточной глубиной вскрытия геотермального резервуара.

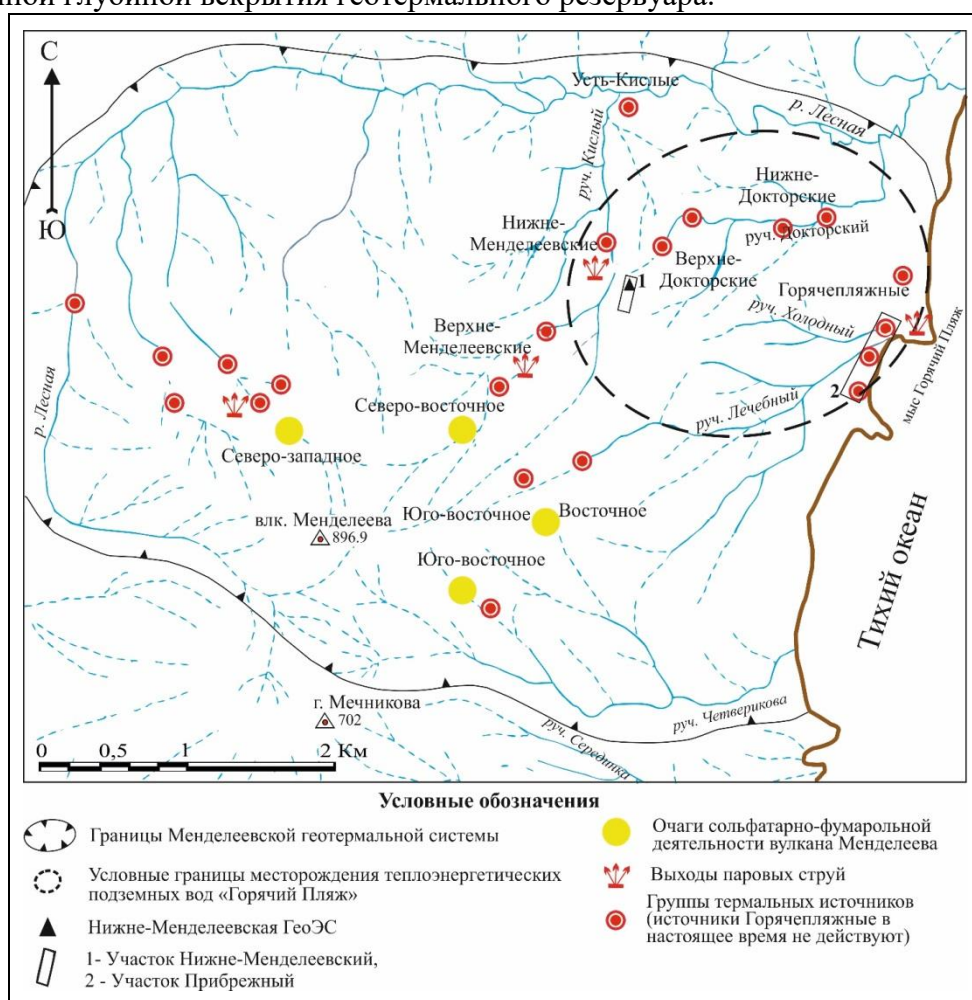


Рисунок 1 – Менделеевская геотермальная система и месторождение «Горячий Пляж»

Для обоснования методики дальнейшего изучения месторождения Горячий пляж нами были проанализированы результаты ранее проведенных геологических и геофизических исследований и опыта эксплуатации действующей Нижне-Менделеевской ГеоЭС.

Гидрогеотермические условия района исследований

Гидрогеологический разрез месторождения Горячий пляж представлен трещинно-пластовыми водоносными комплексами плиоцен-четвертичных вулканогенных отложений. К разломным зонам приурочены трещинно-жильные термальные воды. В пределах

месторождения выделены два разведанных участка – Прибрежный, расположенный на побережье Тихого океана у поселка Горячий пляж, и Нижне-Менделеевский, расположенный на северо-восточных склонах вулкана Менделеева, в 2 км от участка Прибрежного.

Участок Прибрежный приурочен к области разгрузки и выклинивания потока подземных перегретых вод месторождения Горячий пляж на морском побережье. Зоны притока теплоносителя вскрываются скважинами в интервалах глубин 50–300 м. Максимальная температура на глубине 450 м составила 182 °С. Воды хлоридно-натриевые с минерализацией до 5–10 г/л, при опытных выпусках минерализация достигала 25 г/л в результате привлечения к скважинам морских вод (*Асаулов и др., 1979*). Смешение в скважинах морских и инфильтрационных атмосферных вод с перегретыми подземными водами приводит к нарушению карбонатного равновесия в условиях дегазации парогидротерм и образованию в стволах скважин карбонатных пробок на уровне вскипания, что препятствует эксплуатации. В настоящее время подземные перегретые воды участка Прибрежный не используются.

Нижне-Менделеевский участок выделен в результате разведочных работ в районе Нижне-Менделеевских и Верхне-Докторских термальных источников. На участке пробурены разведочные скважины глубиной от 1000 до 1400 м, проведены наземные геофизические работы методом ВЭЗ с разносами АВ/2 до 3000 м.

В гидрогеологическом разрезе участка выделяются четыре зоны (*Рослый и др., 2004*). Сверху до глубины 80–120 м циркулируют холодные и слаботермальные воды преимущественно инфильтрационного происхождения. До глубин 200–250 м – кислые (рН = 1.5–2.5) сульфатно-хлоридные термальные воды с $T = 80\text{--}120$ °С и минерализацией 4– 6 г/л, химический состав которых сформирован в результате воздействия газов (CO_2 , H_2S) отделяющихся при вскипании геотермального флюида. Ниже, до глубин 1 км, под водоупором, представленным интенсивно гидротермально измененными породами (зона аргиллизации), распространена пароконденсатная двухфазная зона геотермального резервуара с температурой до 230 °С. На глубинах более 1.0 км залегает однофазная зона перегретых хлоридно-натриевых вод с минерализацией около 5 г/л, рН ≥ 7 и температурами свыше 250 °С. Тип циркуляции геотермального флюида преимущественно трещинно-жильный, как и связанные с воздействием флюида гидротермальные изменения вмещающих пород. Проницаемые зоны притока теплоносителя вскрываются скважинами на глубинах 500–1270 м, мощность зон от нескольких метров до нескольких десятков метров. Глубже 1270 м геологический и гидрогеотермический разрез бурением не изучен.

Результаты и их обсуждение

Разведочно-эксплуатационные скважины сосредоточены на площадке размером 450×200 м. В настоящее время из 4 введенных в эксплуатацию скважин осталась только одна скважина в рабочем состоянии, но и она из-за соединения интервалов с разным фазовым состоянием флюида и значительно отличающимися пластовыми давлениями работает в пульсирующем режиме, что не позволяет полноценно использовать ее энергетический потенциал. В период с 2005 г. по настоящее время добыча ПВС на Нижне-Менделеевском участке снизилась более чем в 12 раз.

Анализ имеющихся геохимических и гидрогеотермических данных позволяют считать, что на Нижне-Менделеевском участке скважинами вскрыта только верхняя часть геотермального резервуара в зоне интенсивно гидротермально измененных пород (зона аргиллизации). Это подтверждают геоэлектрические разрезы кажущегося сопротивления КС (Рис. 2), построенные нами по результатам переинтерпретации данных ВЭЗ, полученных при геофизических работах 1999–2001 гг. (*Подошвин и др., 2000, 2001*). Интервал с сопротивлениями менее 10 Ом·м, который вскрывается большинством скважин, соответствует интенсивно измененным, а значит слабопроницаемым породам.

На Дачном участке Мутновского месторождения на Камчатке наблюдается аналогичный геоэлектрический разрез по данным МТЗ (*Нурмухамедов и др., 2010*). Верхний слой мощностью 100–250 м представлен вулканогенными неизмененными породами с холодными грунтовыми водами и характеризуется сопротивлениями около 100 Ом·м и более. В интервале глубин 250–1100 м, представленном гидротермально измененными породами (аргиллизитами), наблюдаются

сопротивления в диапазоне от 1 до 12 Ом·м. К этому интервалу приурочена двухфазная пароконденсатная зона. Первые пробуренные скважины на Дачном участке вскрывали в этом интервале продуктивные зоны, но их производительность с течением времени существенно снизилась. В интервале глубин 1100–3000 м, представленном вулканогенными породами с трещинно-жильным типом циркуляции геотермального флюида температурами 270 °С, наблюдаются сопротивления от 100 до 200 Ом·м / Гидротермальные изменения вмещающих пород носят локальный, трещинно-жильный характер, что объясняет повышенные сопротивления по сравнению с зоной аргиллизации. В этом интервале буровыми скважинами вскрыты основные продуктивные зоны и получены максимальные притоки теплоносителя.

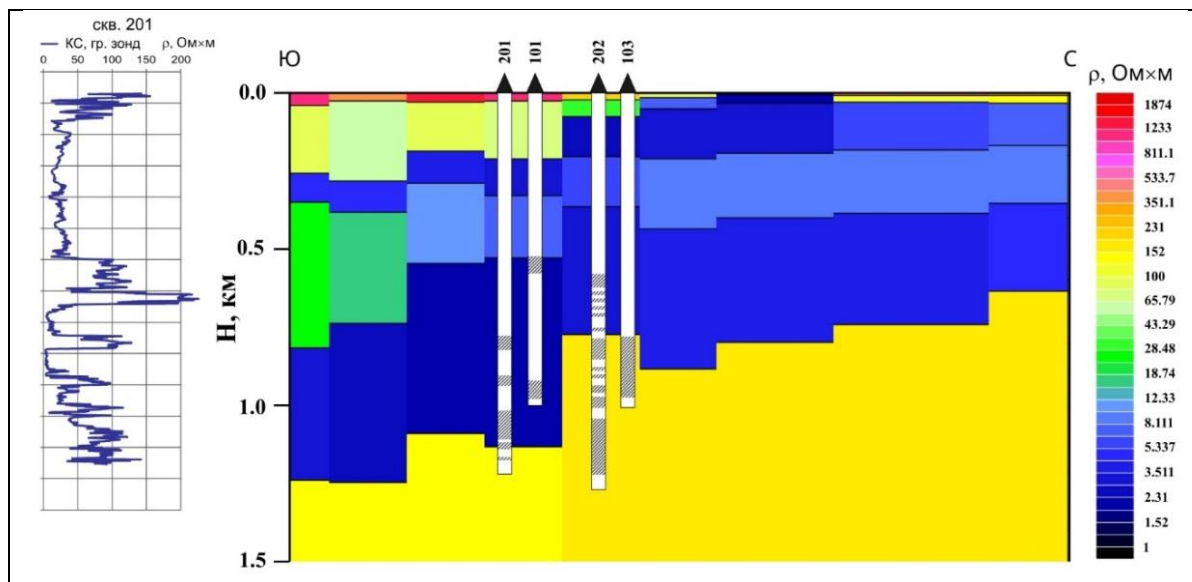


Рисунок 2 – Геоэлектрический разрез Нижне-Менделеевского участка

На основании сопоставления геоэлектрических разрезов и геологического строения Дачного участка Мутновского месторождения и Нижне-Менделеевского участка месторождения Горячий пляж есть основания полагать, что на Нижне-Менделеевском участке основные зоны притока геотермального флюида должны быть вскрыты на глубинах от 1.5 до 2 км, где наблюдается возрастание сопротивлений свыше 100 Ом·м.

Список литературы

1. Асаулов Г.М. Отчет о результатах детальной разведки и оценки запасов парогидротерм месторождения «Горячий пляж» (уч-к «Прибрежный») по состоянию на 1.01.79 г. / Г.М. Асаулов, Н.П. Асаулова Южно-Сахалинск, 1979. Российский Геологический Фонд.
2. Нурмухамедов А.Г. Трехмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм / А.Г. Нурмухамедов, И.И. Чернев, Д.А. Алексеев, А.Г. Яковлев // Физика Земли, 2010. № 9. С. 15–26.
3. Подошвин В.Е. Отчет об изучении центральной части Менделеевской площади о. Кунашир геофизическими методами (ВЭЗ), проведенными ООО МП «Электра» в Южно-Курильском районе Сахалинской области в 2001 г. / В.Е. Подошвин // Южно-Сахалинск, 2001. Российский Геологический Фонд.
4. Подошвин В.Е. Отчет о результатах изучения центральной части Менделеевской площади о. Кунашир (Сахалинская область) методом ВЭЗ в 1999 г. / В.Е. Подошвин, А.Ф. Прядко // Южно-Сахалинск, 2000. Российский Геологический Фонд.
5. Рослый Г.А. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на Нижне-Менделеевском участке месторождения теплоэнергетических вод Горячий Пляж (о. Кунашир) / Г.А. Рослый, Е.А. Руденко, В.Г. Гальверсен // Южно-Сахалинск, 2004. Российский Геологический Фонд.

Взаимодействие магмы и соляных отложений как этап формирования предельно насыщенных редкометальных рассолов Сибирской платформы

**А.В. Сергеева¹, А.Г. Вахромеев², А.В. Кирюхин¹, А.В. Гладышкина³, Е.Г. Карташева¹,
М.А. Назарова¹, А.А. Кузьмина¹**

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
anastavalers@gmail.com*

²*Институт земной коры, Иркутск, Россия*

³*ГАНУ ВО «Региональный центр «Орион», Воронеж, Россия*

В работе рассмотрены возможные геохимические процессы, приведшие к формированию сверхкрепких и предельно насыщенных хлоридных магниевых-кальциевых рассолов Сибирской платформы, их дополнительному обогащению литием. Наиболее вероятным представляется сценарий, при котором концентрирование до предельно насыщенных рассолов хлоридов кальция и магния произошло в результате воздействия кислых флюидов, содержащих хлороводород, на карбонатные отложения. Процесс является результатом внедрения базитовой магмы в осадочный чехол с хлоридными рассолами и формированием промежуточных магматических очагов в основании галогенно-карбонатной толщи, состоявшего из нескольких стадий.

Ключевые слова: Литий, Ангаро-Ленский артезиальный бассейн, Сибирская платформа, трапповый магматизм, галит, гидролиз

Interaction of magma and salt deposits as a stage in the formation of extremely saturated rare-metal brines of the Siberian platform

Anastasia V. Sergeeva¹, Andrey G. Vakhromeev², Alexey V. Kiryukhin¹, Anna V. Gladyschkina³,
Elena G. Kartasheva¹, Maria A. Nazarova¹, Anna A. Kuzmina¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

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

³*Orion Regional Educational Center, Voronezh, Russia*

The paper considers possible geochemical processes that led to the formation of super-strong and extremely saturated chloride magnesium-calcium brines of the Siberian platform, their additional enrichment with lithium. The most probable scenario seems to be that the concentration of calcium and magnesium chlorides to extremely saturated brines occurred as a result of the impact of acidic fluids containing hydrogen chloride on carbonate deposits. The process is the result of the intrusion of basic magma into the sedimentary cover with chloride brines and the formation of intermediate magmatic chambers at the base of the halogen-carbonate strata, which consisted of several stages.

Keywords: Lithium, Angara-Lena artesian basin, Siberian platform, trap magmatism, halite, hydrolysis

Введение

Один из не решенных вопросов минерагении поликомпонентных рассолов Ангаро-Ленского артезианского бассейна – максимальные концентрации брома и редких металлов, в первую очередь лития (Li), в рассолах галогенно-карбонатной гидрогеологической формации (400–725 мг/дм³ по металлу). Эволюция Сибирской платформы (СП) в докембрии и фанерозое включала несколько мощнейших циклов кимберлитового и траппового магматизма «корневого» типа – внедрения мантийных расплавов в платформенный чехол (Фон-дер-Флаасс, 2000). Базитовый магматизм сыграл роль мощного катализатора геохимических процессов в системе вода-порода. Воздействие магматических расплавов на вмещающие породы и флюиды, и последующие гидротермальные циклы магматических этапов вызвали контаминацию пород галогенно-карбонатной толщи, их расплавление,

вскипание водонапорных систем, процессы магмо- и гидроразрыва, испарительное концентрирование рассолов с обогащением по бром, щелочно-земельным металлам.

Изучению геологии, геохимии трапповых интрузий Сибирской платформы посвящены работы В.С. Обручева, И.И. Краснова, В.С. Масайтиса, М.М. Одинцова, Г.М. Левинсона-Лессинга, Г.Д. Феокистова и мн. др. геологов. Наиболее распространённым является мнение о поступлении долеритовых силлов из Канско-Тасеевской впадины – очаговой зоны траппового магматизма по моноклиальному падению пород. В пределах Иркутской области выделен ряд наиболее крупных интрузивов, среди которых Окинский, Купский, Вихоревский, Братский, Седановский, Тубинский, Тушамский, Средне-Ангарский, Верхнее Катанский, Усольский силлы, залегающих в нижней части осадочного чехла. По петрографическим, минералогическим и структурным признакам во всех интрузиях условно выделены три морфологических зоны: центральная или надкорневая, периферическая, и зона выклинивания; центральная (зона) силлов имеет истинную толщину до 250 м; периферическая от 50 до 100 метров, приспособляясь к общему простиранью слоистой галогенно карбонатной толщи; толщины зон выклинивания до 50 м.

Внедрение магм в осадочный чехол, под влиянием давления, раскаленного до 1200 °С расплава магмы привело к формированию промежуточных магматических очагов в осадочном чехле (*Кирюхин А.В., 2022; Страхов Л.Г., 1978; Фон-дер-Флаасс, 2000*). Физической основой процесса взаимодействия расплава базальтовой магмы, вмещающих осадочных пород нижнекембрийских эвапоритов осадочного чехла и подземных вод глубоких горизонтов – рассолов, является высокотемпературное воздействие поступавшего из мантии базальтового расплава (*Вахромеев, 2024; Кирюхин, 2022; Страхов, 1978*). При взаимодействии перечисленных систем первой, наиболее активно реагирующей на изменение температурных условий является система водных растворов, природных хлоридных рассолов. Фазовые переходы воды в природных рассолах находятся достаточно близко к температуре 100 градусов – к температуре кипения воды. Следующая критическая точка, 273 °С – точка перехода воды в закритическое состояние, где отличия свойств воды и пара стираются. Важными точками температурных переходов являются значения, при которых происходят плавления хлоридных солей, разложения карбонатов и сульфатов.

На гигантской территории юга СП массовое внедрение базальтового расплава по системе магмоподводящих разломов в надочаговые пространства, на уровень нижнекембрийского карбонатно-галогенного комплекса, пород шло с образованием расщеплённых по флангам магматических периферических камер. Термическое воздействие расплава на боковые породы сопровождалось грануляцией, радиальным проникновением по наименее устойчивым слоям, то есть послойно, а в центральной части структуры «полное ожигание вмещающей эвапоритовой толщи, интенсивное перемешивание вновь возникшего карбонатно-солевого расплава с гранулированным силикатным, сопровождаемое выделением рудной фазы» (*Фон-дер-Флаасс, 1978*). Все процессы шли под экраном вышележащей галогенной толщи. На последующей стадии происходило внедрение силикатно-карбонатной и рудно-карбонатной эмульсионных смесей в послойные трещины с образованием силлообразных тел, в осадочной толще при постоянном подтоке рассолов, т.е. при участии водной фазы. Опережая магму, на этой глубине благодаря паро-газовому фронту сформировался горизонт/слой водно-соляных отложений, состоящих преимущественно из галита и его насыщенного раствора (*Беленицкая, 2021*). Наложённым на этот магматический этап является гидротермально метасоматический этап. Этот этап в последнее время на месторождениях Ангарской провинции считался ведущим в рудообразовании, поэтому связанным с ним процессам посвящён целый ряд специальных исследований.

Обсуждение

При магматической активизации силикатный расплав внедряется через рассолонасыщенные природные резервуары терригенной гидрогеологической формации в горизонты эвапоритовой толщи, под которой, и в которой залегают межсолевые карбонатные

резервуары с порово-трещинным типом сложных карбонатных коллекторов, формируя в низах галогенно-карбонатной толщи раннего кембрия промежуточную магматическую камеру. Идет взаимодействие и контаминация карбонатов и галита, а также насыщенных растворов хлорида натрия в силикатном расплаве. Высокая температура магматического расплава $>600\text{ }^{\circ}\text{C}$ обуславливает старт процесса гидролиза галита, с образованием газообразного хлороводорода. Этот процесс происходит по схеме: $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}(\text{газ}) = \text{NaOH} + \text{HCl}(\text{газ})$ (Hanf, 1970). В реакции галита с перегретым водяным паром, образовался летучий хлороводород, уносимый потоком вверх, по флюидодинамическим структурам, трещинам, зонам разуплотнения в ближайшие пласты перекрывающих карбонатных отложений. Высокотемпературные пары хлороводорода – соляной кислоты это сверх агрессивный растворитель карбонатных толщ, особенно по зонам коллекторов и разуплотнения. По Г.А. Беленицкой (Беленицкая, 2021), результатом взаимодействия магмы и хлорида натрия становятся щелочные массивы, в этом случае гидролитическое уравнение подчиняется схеме: $[\text{SiO}_2] + 2\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} = [\text{Na}_2\text{SiO}_3] + 2\text{HCl}$, где $[\text{SiO}_2]$ – условный силикат.

Карбонаты кальция и магния, встретившиеся с потоком хлороводорода, водяного пара и других газов, прореагировали с HCl по естественной схеме: $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} = \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$; $\text{MgCO}_3 + 2\text{HCl} = \text{MgCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Образующиеся хлориды кальция и магния в присутствии водяного пара сформировали крепкие рассолы, по сути – расплавы собственных кристаллогидратов, антарктицита $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, бишофита $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. В ходе реакции выделилось большое количество углекислого газа под давлением. Часть карбонатов осталась, очевидно здесь требуется расчет материального баланса химических реакций. Вероятно, хлороводорода хватило на реакцию со определенным объемом массива карбонатных отложений, и процессы глубинного солевого и карбонатного карста протекали локализованно в ослабленных зонах галогенно-карбонатной толщи и в первую очередь по слоям с наименьшим значением, горизонтальной составляющей горного давления.

Концентрирование редких металлов, и в первую очередь лития в рассолах хлоридов кальция и магния вполне закономерно, так как хлорид лития при высоких температурах довольно летуч, его температура плавления чуть выше $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, и он заметно отгоняется даже из расплавов солей (Салюлев, 2020а, 2020б). Поэтому наиболее вероятный сценарий образования богатых литиеносных рассолов здесь, в инъективных «рапа-силлах» (Вахромеев, 2024) включает обогащение потока хлороводородного флюида хлоридом лития, взаимодействие хлороводорода с карбонатами, преобразование рассолов, связывание хлорида лития в рассолах хлоридов кальция и магния посредством растворения. Содержание лития в галите, который образуется при испарении морской воды, в настоящее время находится в пределах 14 – 40 ppm (Lin, 2024), поэтому при воздействии высокотемпературного пара происходит не только гидролиз хлорида натрия, но и возгонка довольно летучего LiCl. Другими словами, это «механизм» мобилизации дополнительного хлорида лития из рассеянного состояния в галитовой толще, ангидритах. Здесь авторы имеют в виду дополнительное обогащение литием «рапа-силлов» относительно исходных значений, массово фиксируемых аналитическими методами в пробах рассолов терригенной формации (90–130 мг/л).

Заключение

К концентрированию лития в геохимически закрытых системах вели три базовых процесса – эвакуация хлороводородом из галогенных и карбонатно-сульфатных пород толщи, привнос с мантийными гидротермами магматического расплава по циркуляции и концентрирование рассолов терригенной формации до уровня предельно насыщенных в процессе испарения воды-растворителя при формировании пародоминирующих водопаронапорных флюидных систем (Вахромеев, 2024; Кирюхин, 2022). Карбонаты же и сульфаты при нагреве склонны к разложению, нежели к плавлению, при этом углекислота или серосодержащие соединения уносятся потоками флюидов, а оставшиеся оксиды металлов поглощаются магмой, придавая ей щелочной характер. Примером может служить поведение карбоната кальция при контакте с силикатной магмой: $\text{CaCO}_3 + [\text{SiO}_2] =$

[CaSiO₃] + CO₂. Описанная модель формирования рапа-силлов предельно-насыщенных рассолов, богатейших (до 4,30 кг/м³) по хлориду лития, согласуется с идеей Е.Д. Михеевой с соавторами – полигенно полихронного концентрирования лития с участием эндогенных источников вещества, (Михеева, 2024).

Для концентрированных рассолов характерен поликомпонентный состав (65 элементов Таблицы Менделеева), который мог сформироваться в том числе при растворении карбонатов, и карбонатитов, обогащенных рядом элементов (Летникова, 2008). Карбонатиты складчатого обрамления Сибирской платформы также имеют богатый редкометальный состав, в них встречаются редкоземельные элементы иттрий, иттербий, европий, гафний, за счет своей склонности к образованию карбонатных комплексов с последующим соосаждением, стронций и барий, цирконий и ряд других. При растворении карбонатов эти элементы высвобождаются с переходом в раствор хлорида кальция и магния, либо в малорастворимые соединения, но так как рассолы довольно активны химически, значительная часть ценных элементов из карбонатов перешла в рассол.

Список литературы

1. Hanf N.W. High-temperature hydrolysis of sodium chloride / N.W. Hanf, M.J. Sole // Transactions of the Faraday Society. 1970. Т. 66. С. 3065–3074.
2. Lin Y. Experimental and theoretical constraints on lithium isotope fractionation during brine evaporation and halite precipitation / Y. Lin et al. // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2024. Т. 374. С. 250–263.
3. Беленицкая Г.А. Об участии природных солей в щелочном магматизме. Статья 3. Генетические аспекты модели соляно-щелочных взаимодействий // Литосфера. 2021. Т. 21. № 2. С. 172–197.
4. Вахромеев А.Г. Моделирование условий формирования рапа-силлов и эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы / А.Г. Вахромеев, А.В. Кирюхин, А.В. Сергеева, И.В. Литвинова // Подземная гидросфера: материалы Всеросс. Сов-я по подз. Водам Сибири и Д. Востока. Екатеринбург: Ин-т горного дела ИГД УрОРАН, 2024. С. 14–19.
5. Кирюхин А.В. Геомеханические условия формирования вулканических и гидротермальных систем // Geothermal Volcanology Workshop 2022. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 9–13.
6. Летникова Е.Ф. Геохимические типы карбонатных отложений южного обрамления Сибирской платформы // Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск. 2008.
7. Михеева Е.Д. Геолого-генетическая модель, поисковые критерии и признаки месторождений литиеносного гидроминерального сырья / Е.Д. Михеева, П.С. Кузьменко, Д.С. Ключарев // Отечественная геология. № 1. 2024. С. 33–42.
8. Салюлев А.Б. Отгонка компонентов расплавленных смесей (LiCl–KCl)эвт–BaCl₂–SrCl₂–NdCl₃ при пониженных давлениях / А.Б. Салюлев и др. // Физическая химия и электрохимия расплавленных и твердых электролитов. Екатеринбург, 2020а. 2020. С. 65–69.
9. Салюлев А.Б. Селективное испарение компонентов расплавленных смесей (LiCl–KCl) эвт–BaCl₂–SrCl₂–NdCl₃ при пониженных давлениях / А.Б. Салюлев и др. // Расплавы. 0206. №. 4. С. 363–374.
10. Страхов Л.Г. Рудоносные вулканические аппараты юга Сибирской платформы // Изд-во Наука, Новосибирск, 1978. 120 с.
11. Фон-дер-Флаасс Г.С. Атлас структур рудных полей железорудных месторождений / Г.С. Фон-дер-Флаасс, В.И. Никулин // Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2000. 192 с.

Научное издание

**Материалы всероссийской научной конференции с международным участием
«Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа»
(Geothermal Volcanology Workshop 2024)
2 – 8 сентября 2024 г.**

**Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation
«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology»
(Geothermal Volcanology Workshop 2024),
September 2 – 8, 2024**

Подписано к печати **XX.10.2024**

Формат 60x84/8

Бумага типографская

Усл.-печ. л. 19.75

Тираж 23 экз.

Заказ № XXXX

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в ИВиС ДВО РАН,
в ООО «ФОН», 683024, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Владивостокская д. 37