МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

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 2026)

6 — 12 сентября 2026 г.

Материалы конференции








ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ
2026

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 2026)

September 6 — September 12, 2026








PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY
2026

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 2026), 6 – 12 сентября 2026 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2026. – 103 с.

Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2026), September 6 – 12, 2026 – Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2026. – 103 p.

ISBN 978-5-902424-46-8

В сборнике представлены материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2026), проведенной Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в 2026 г. Освещаются результаты исследований по геотермофлюидомеханике вулканических, гидротермальных и углеводородных систем.

This Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil & Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2026) was held in Petropavlovsk-Kamchatsky in 2026 by Institute of Volcanology & Seismology FEB RAS. The results of geothermofluidmechanics studies of the volcanic, hydrothermal & hydrocarbon systems are presented.

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. 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, О.О. Усачева

ISBN 978-5-902424-46-8 © ИВиС ДВО РАН, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ВУЛКАНОЛОГИЯ (МАГМАТИЧЕСКИЕ И МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, МАГМАТОГЕННЫЕ И ЭПИТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ТРУБКИ ВЗРЫВА)

Баранов Т.С., Хмарин Э.К., Степанов М.А.

Выделение элементов геологической модели Мутновского парогидротермального месторождения по данным стандартного комплекса ГИС 9

Кирюхин А.В., Поляков А.Ю., Усачева О.О.

Инверсионное трехмерное термогидродинамическое моделирование условий формирования Северо-Мутновской гидротермальной системы (Камчатка, Россия) 13

Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Сергеева А.В., Кравченко О.В., Чернов М.С., Пальянова Г.А.

Практическое значение литологических и минералого-геохимических исследований геотермальных систем, новые данные (Паужетский район, Камчатка) 17

Вивек С. Дж., Бергаль-Кувикас О.В., Плутахина Е.Ю.

Идентификация конечных членов магматических серий моногенного конуса Зеленый, Малко-Петропавловская зона поперечных дислокаций, Камчатка 21

Феофилактов С.О., Самойлова О.М.

Строение Кошелевского вулканического массива по геоэлектрическим данным (Южная Камчатка) 25

Букатов Ю.Ю., Феофилактов С.О.

Сеточные (грид) двумерные модели избыточных плотностей на площади Нижне-Кошелевской термонаномалии (Кошелевский вулканический массив, Южная Камчатка) 29

Степанов М.А., Баранов Т.С., Хмарин Э.К.

Опыт применения геотермометров на активах ООО «ЗН Геотерм» 32

РАЗДЕЛ II. ГИДРОГЕОЛОГИЯ (ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ И ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, ГЕЙЗЕРЫ)

Кирюхин А.В., Поляков А.Ю., Усачева О.О., Афонин М.И.

Применение геотермотомографии для выявления продуктивных геотермальных резервуаров и зон конвективной циркуляции теплоносителя в Северо-Мутновской гидротермальной системе (Камчатка, Россия) 37

Сергеева А.В., Журавлев Н.Б., Кирюхин А.В., Лыга Р.И., Карташева Е.В., Назарова М.А., Кузьмина А.А., Хубаева О.Р., Воронин П.О., Мальцева Н.А., Верескун А.Д.

Отложения коллоидного кремнезема из скважин Мутновского геотермального месторождения 41

Корчагина А.П., Кирюхин А.В.

Моделирование теплоизвлечения из одиночной геотермальной скважины (методы коаксиального теплообмена) 45

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

Лемзиков М.В.

Механизмы очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Кизимен (Камчатка) 49

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

Сейсмо-гидрогеодинамические эффекты в подземных водах (по данным прецизионных наблюдений в скважинах Камчатки)..... 53

Соломатин А.В.

Развитие сейсмического процесса в очаге Камчатского мегаземлетрясения 2025 г. и прогноз опасности для юго-восточного побережья Камчатки последующих сейсмических событий..... 57

РАЗДЕЛ IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ (ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС, ГЕОМЕХАНИКА, ХИМИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ)

Храмченков М.Г.

Реология пористых сред с пористым скелетом переменной массы..... 62

Сулеева Д.Р.

Геофильтрационное и геомиграционное моделирование как инструмент оценки экологических рисков в вулканических регионах..... 66

РАЗДЕЛ V. МЕТОДЫ ПОИСКА, УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ, ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ

Шипаева М.С., Усманов С.А., Федотова А.С.

Гидроминеральное сырье попутных вод нефтяных месторождений 69

Бородулина Г.С.

Гидроминеральные ресурсы восточного склона Фенноскандинавского щита 73

Шарапов А.С.

Палеовулканы как аппараты массопереноса вещества и энергии для формирования нефтегазовых месторождений Надым-Пурской и Среднеобской НГО 77

Ланкин Ю.К., Вахромеев А.Г.,Данилова М.А., Кураничева А.И., Сверкунов С.А.

Опыт и методика определения параметров глубоких водоносных горизонтов для оценки запасов промышленных подземных вод на юге Сибирской платформы 81

Данилова М.А., Вахромеев А.Г., Левин А.В., Квачко С.К., Губин И.А., Кирюхин А.В., Сергеева А.В., Горохов А.П., Корзун А.В.

К проблемам ресурсной оценки и вовлечения в освоение промышленных рассолов артезианских бассейнов Сибирской платформы (на примере Преображенского месторождения, Непский свод) 85

Тиханович И.А., Вахромеев А.Г., Горохов Р.В., Сверкунов С.А., Ланкин Ю.К., Малышев А.А., Мисюркеева Н.В., Ильин А.И.

Проблематика целевых ГРР на промышленные рассолы на примере Ковыктинского месторождения (Ангаро-Ленский кластер)..... 89

РАЗДЕЛ VI. ТЕХНОЛОГИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Елистратов С.Л.

Передовые технологии использования тепла Земли 94

РАЗДЕЛ VII. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ШКОЛА

Афонин М.И., Кирюхин А.В.

Интерпретация геотермотомографии Северо-Мутновской гидротермальной системы с использованием дифференциальных операторов 97

Василевская В.В., Деева Е.Д., Литвинов М.Р.

Оценка геотермального потенциала Северо-Мутновской гидротермальной системы (Камчатка) 101

TABLE OF CONTENTS

CHAPTER I. GEOTHERMAL VOLCANOLOGY (MAGMATIC AND MAGMATIC-HYDROTHERMAL SYSTEMS, MAGMATOGENIC AND EPITHERMAL FIELDS, MAAR-DIATREME VOLCANOES/EXPLOSION PIPES)

Baranov Timofey S., Khmarin Eduard K., Stepanov Mikhail A.

Identifying Elements of the Mutnovsky Geothermal Reservoir Using Standard Well Logs 9

Kiryukhin Alexey V., Polyakov Andrey Yu., Usacheva Olga O.

Inverse Three-Dimensional Thermohydrodynamic Modeling of the Formation Conditions of the Severo-Mutnovsky Hydrothermal System (Kamchatka, Russia) 13

Rychagov Sergei N., Sandimirova Elena I., Sergeeva Anastasia V., Kravchenko Olga V., Chernov Mikhail S., Palyanova Galina A.

Practical Value of Lithological and Mineralogical Geochemical Researches of Geothermal Systems, New Data (Pauzhetsky Area, Kamchatka) 17

Vivek S.J., Bergal-Kuvikas Olga V., Plutakhina Ekaterina Yu.

Identifications of End-Members of Magmatic Series of Monogenetic Cone Zelenyi, Malko-Petropavlovsk Zone of Transverse Dislocation, Kamchatka 21

Feofilaktov Sergey O., Samoylova Olga M.

Structure of the Kosheleva Volcanic Massif Based on Geoelectrical Data (South Kamchatka) 25

Bukatov Yuriy Yu., Feofilaktov Sergey O.

Two-Dimensional Models of Excess Densities on the Area of the Nizhne-Koshelevskaya Thermal Anomaly (Koshelevsky Volcanic Massif, Southern Kamchatka) 29

Stepanov Mikhail A., Baranov Timofey S., Khmarin Eduard K.

Experience in Using Geothermometers at ZN Geotherm LLC Licensed Areas 32

CHAPTER II. HYDROGEOLOGY (HYDROTHERMAL SYSTEMS, GEOTHERMAL AND HYDROMINERAL RESOURCES, GEYSERS)

Kiryukhin Alexey V., Polyakov Andrey Yu., Usacheva Olga O., Afonin Mikhail I.

The Use of Geothermotomography to Identify Productive Geothermal Reservoirs and Zones of Convective Heat Transfer Circulation in the North-Mutnovsky Hydrothermal System (Kamchatka, Russia) 37

Sergeeva Anastasia V., Zhuravlev Nikita B., Kiryukhin Alexey V., Lyga Rita I., Kartasheva Elena V., Nazarova Maria A., Kuzmina Anna A., Khubaeva Olga R., Maltseva Natalya A., Vereskun Anastasia D.

Colloidal Silica Deposits From The Mutnovsky Geothermal Field Wells 41

Korchagina Anastasia P., Kiryukhin Alexey V.

Modeling Heat Extraction from a Single Geothermal Well (Coaxial Heat Transfer Methods) 45

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

Lemzikov Michail V.

Focal Mechanisms of Volcanic-Tectonic Earthquakes of Kizimen Volcano 49

Kopylova Galina N., Boldina Svetlana V.

Seismo-Hydrogeodynamic Effects in Groundwaters (Based on Precision Observations in Kamchatka Wells) 53

Solomatin Alexey V.

Development of the Seismic Process in the Source Zone of the 2025 Kamchatka Megathrust Earthquake and Hazard Forecast for Subsequent Seismic Events on the Southeastern Coast of Kamchatka 57

CHAPTER IV. MODELING OF GEOFLUID SYSTEMS (HEAT AND MASS TRANSFER, GEOMECHANICS, CHEMICAL TRANSPORT AND INTERACTIONS)

Khramchenkov Maxim G.

Rheology of Porous Media with a Porous Skeleton of Variable Mass 62

Suleeva Diana R.

Groundwater Flow and Transport Modeling as a Tool for Environmental Risk Assessment in Volcanic Regions 66

CHAPTER V. EXPLORATION METHODS, FORMATION CONDITIONS, AND EXPLOITATION OF COMPLEX-STRUCTURE GEOTHERMAL, HYDROMINERAL, AND HYDROCARBON FIELDS

Shipaeva Maria S., Usmanov Sergey A., Fedotova Anastasia S.

Oilfield Produced Water as a Source of Valuable Mineral Resources 69

Borodulina Galina S.

Hydromineral Resources of the Eastern Slope of the Fennoscandian Shield 73

Sharapov Anatolii S.

Paleovulcanic Structures as Mass Carry of Matter and Energy Systems Controlling Petroleum Generation within the Nadym-Pur and Middle Ob Oil and Gas Region 77

Lankin Yuriy K., Vakhromeev Andrey G., Danilova Maria A., Kuranicheva Anna I., Sverkunov Sergey A.

Experience and Methodology for Determining the Parameters of Deep Aquifers and Horizons to Assess the Reserves of Industrial Groundwater in the Southern Part of the Siberian Platform 81

Danilova Maria A., Vakhromeev Andrey G., Levin Aleksey V., Kvachko Svetlana K., Gubin Igor A., Kiryukhin Aleksey V., Sergeeva Anastasia V., Gorokhov Alexander P., Korzun Anna V.

On the Issues of Resource Assessment and the Involvement of Industrial Brines from Artesian Basins of the Siberian Platform in Development (Using the Preobrazhenskoye Field and the Nepsky Arch as an Example) 85

Tikhanovich Igor A., Vakhromeev Andrey G., Gorokhov Roman S., Sverkunov Sergey A., Lankin Yuriy K., Malyshev Artem A., Misyurkeeva Natalya V., Ilyin Anton I.

The Challenges of Targeted Geological Exploration for Industrial Brines, Using the Kovykta Deposit (Angaro-Lena Cluster) as an Example 89

CHAPTER VI. TECHNOLOGIES FOR DECENTRALIZED GEOTHERMAL ENERGY

Elistratov Sergey L.

Advanced Technologies for Harnessing Earth's Heat 94

CHAPTER VII. GEOTHERMAL SCHOOL

Afonin Mikhail I., Kiryukhin Alexey V.

Interpretation of Geothermotomography
of the Severo-Mutnovsky Hydrothermal System Using Differential Operators 97

Vasilevskaya Victoria V., Deeva Ekaterina D., Litvinov Maxim R.

Assessment of the Geothermal Potential of the North Mutnovsky Hydrothermal System 101

РАЗДЕЛ I. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ВУЛКАНОЛОГИЯ (МАГМАТИЧЕСКИЕ И МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, МАГМАТОГЕННЫЕ И ЭПИТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ТРУБКИ ВЗРЫВА)

CHAPTER I. GEOTHERMAL VOLCANOLOGY (MAGMATIC AND MAGMATIC-HYDROTHERMAL SYSTEMS, MAGMATOGENIC AND EPITHERMAL FIELDS, MAAR-DIATREME VOLCANOES/EXPLOSION PIPES)

УДК 550.832.2:550.36(571.66)

Выделение элементов геологической модели Мутновского парогидротермального месторождения по данным стандартного комплекса ГИС

Т.С. Баранов[1], Э.К. Хмарин[1,2], М.А. Степанов[1]

[1]АО «Зарубежнефть», г. Москва, Россия
tbaranov@nestro.ru
[2]ООО «ЗН Геотерм», (АО «Зарубежнефть»), Москва, Россия

Собрана цифровая геолого-геофизическая база данных Мутновского парогидротермального месторождения. Оцифрованы архивные планшеты ГИС, литологические описания, стратиграфические отбивки, интервалы предполагаемых зон притоков и сведения о результатах бурения. Исходные скважинные данные сопоставлены с концептуальными представлениями о строении геотермальной системы и результатами площадных магнитотеллурических исследований. По данным стандартного комплекса ГИС сформированы предварительные критерии выделения элементов геологической модели: предполагаемой зоны покрышки, подошвы флюидоупора и кровли резервуара. Результаты требуют подтверждения керном, промыслово-геофизическими наблюдениями и расширенным комплексом ГИС при последующем бурении.

Identifying Elements of the Mutnovsky Geothermal Reservoir Using Standard Well Logs

Timofey S. Baranov[1], Eduard K. Khmarin[1,2], Mikhail A. Stepanov[1]

[1]Zarubezhneft JSC, Moscow, Russia
[2]ZN Geotherm LLC (Zarubezhneft JSC), Moscow, Russia

A digital geological and geophysical database was compiled for the Mutnovsky geothermal field. Archival well logs, lithological descriptions, stratigraphic markers, assumed feed-zone intervals and drilling data were digitized. Standard well-log responses were compared with the conceptual model and magnetotelluric data. Preliminary criteria are proposed for identifying a possible cap-rock interval, the base of the fluid seal and the underlying reservoir zone. The results require verification by core studies, production logging and an advanced open-hole well logging suite.

Введение

Мутновское парогидротермальное месторождение расположено в Елизовском районе Камчатского края, примерно в 80 км от г. Петропавловска-Камчатского, у северных склонов действующего вулкана Мутновский. По данным фондовых материалов, на месторождении пробурено порядка 100 скважин, однако материалы каротажа доступны только по ограниченной части фонда скважин [1].

Ранее для изучения глубинного строения месторождения выполнялись площадные магнитотеллурические исследования, по результатам которых построена трёхмерная геоэлектрическая модель [2]. МТЗ характеризует крупные геоэлектрические неоднородности, тогда как детальное выделение границ флюидоупора и продуктивных интервалов возможно только при анализе скважинных данных.

Вулканогенные геотермальные системы отличаются высокой латеральной и вертикальной неоднородностью лавовых, пирокластических, интрузивных и гидротермально изменённых пород; аналогичные проблемы корреляции разрезов описаны для месторождения Salak в Индонезии [3]. Несмотря на отдельные работы по применению стандартного комплекса ГИС на Дачном участке [4, 5], для Мутновского резервуара отсутствует целостная интерпретационная модель, связывающая каротажные признаки с литологией, гидротермальной изменённостью, трещиноватостью и продуктивностью. Цель работы – систематизировать архивные скважинные материалы и сформировать предварительные критерии выделения элементов геологической модели по данным стандартного комплекса ГИС.

Исходные данные и ограничения интерпретации

В работе оцифрованы архивные планшеты ГИС по 19 скважинам, для которых доступны кривые каротажа кажущегося сопротивления (КС), самопроизвольной поляризации (ПС), гамма-каротажа (ГК) и термометрии. Материалы сопоставлены с литологическими описаниями, стратиграфическими отбивками, зонами интрузий, интервалами предполагаемых притоков и потерями циркуляции при бурении.

КС, ПС и ГК позволяют выполнять качественное расчленение разреза, но не обеспечивают однозначного перехода от каротажных признаков к количественным параметрам резервуара: эффективной пористости, трещиноватости и проницаемости. Прямая увязка скважинных признаков с МТЗ и керном ограничена различием масштабов методов, неполнотой архивных данных и отсутствием непрерывной керновой калибровки. Поэтому стандартный комплекс ГИС используется как источник предварительных признаков для выделения зоны покрышки, подошвы флюидоупора и предполагаемой кровли резервуара.

Анализ данных ГИС

Анализ диаграмм ГК показал возможность выделения каротажных признаков, связанных с элементами концептуальной модели геотермального резервуара. По характеру изменения кривой ГК условно выделяются три интервала (рис. 1): верхняя зона пониженных значений ГК, интерпретируемая как интервал высокопористых туфовых разностей; переходная зона повышенных и изменчивых значений ГК, предположительно связанная с интенсивной гидротермальной переработкой и аргиллизацией пород; нижележащая зона более устойчивых значений ГК, рассматриваемая как предполагаемая зона резервуара.

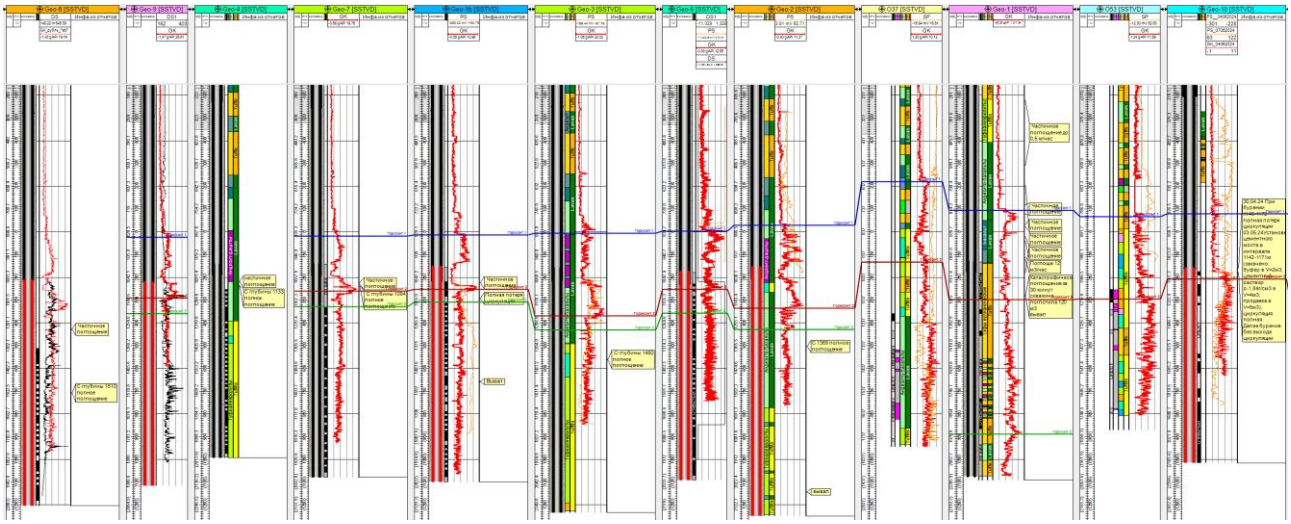


Рисунок 1 – Корреляционная схема по скважинам с результатами бурения

Переходная зона рассматривается как возможный элемент флюидоупора, ограничивающего верхнюю часть продуктивного резервуара. Косвенным аргументом служит положение интервалов поглощений при бурении: они, как правило, фиксируются ниже зоны интенсивной изменчивости ГК. Поэтому выделенная граница может использоваться как предварительный прогноз подошвы флюидоупора и ориентир для прогноза кровли продуктивной части резервуара.

Сопоставление с данными МТЗ

Для независимой проверки выполнено сопоставление выделенных по ГК зон с результатами МТЗ. По данным [2], геоэлектрическая модель отражает распределение крупных низкоомных и высокоомных областей. В геотермальных системах низкоомные зоны часто связываются с гидротермально изменёнными породами, глинистыми минералами и флюидонасыщенными интервалами, однако их интерпретация должна учитывать масштаб и разрешающую способность метода.

Сопоставление показывает качественное соответствие между выделенными по скважинам границами и положением низкоомного горизонта по МТЗ (рис. 2). Это не является прямым совпадением геологических границ: МТЗ характеризует интегральное распределение сопротивления в объёме пород с разрешением порядка сотен метров, тогда как ГИС отражает строение разреза вблизи ствола скважины. Тем не менее, качественная корреляция поддерживает интерпретацию переходной зоны как возможной зоны покрышки.

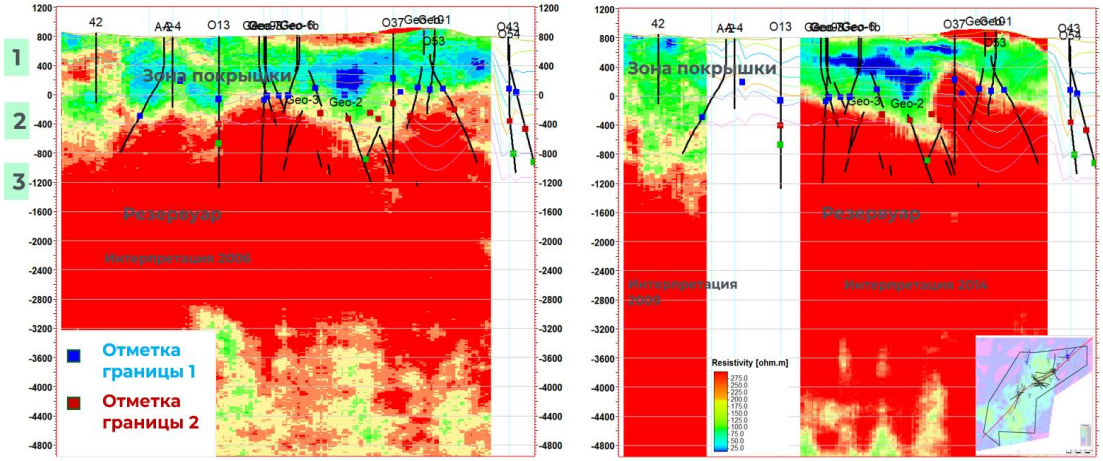


Рисунок 2 – Сопоставление выделенных по скважинам зон и данных МТЗ

Карта подошвы флюидоупора

На основе выделенных по ГК границ построена предварительная карта подошвы флюидоупора (рис. 3). Скважинные данные доступны преимущественно для северной части месторождения; на участках без прямых скважинных ограничений использован тренд, согласованный с картой подошвы низкоомного горизонта по МТЗ. Полученная поверхность является интерпретационной: она объединяет скважинные признаки, данные бурения и площадные геоэлектрические ограничения и может применяться как рабочий инструмент для сопровождения бурения и прогноза кровли резервуара.

Необходимость расширенного комплекса ГИС

Стандартный комплекс ГИС позволяет сформировать предварительную схему строения резервуара, но не обеспечивает необходимой детализации для уверенного выделения литологических комплексов, зон гидротермального изменения, интервалов дробления и потенциальных зон притока. Для перехода от качественного выделения зон к параметрической модели резервуара необходимы новые данные расширенного комплекса ГИС, керна и испытаний. Их совместная интерпретация позволит уточнить литологическое расчленение, межскважинную корреляцию, геологические элементы резервуара и закономерности их пространственного распределения.

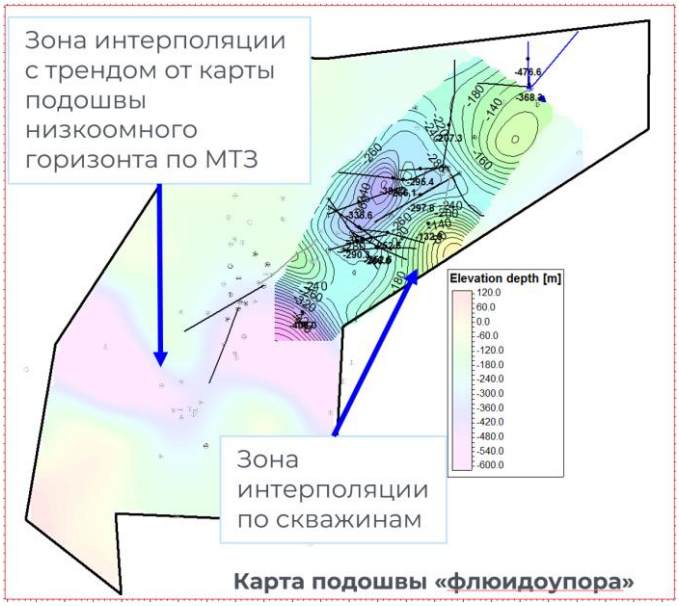


Рисунок 3 – Предварительная карта подошвы флюидоупора

Выводы

1. Собрана и систематизирована цифровая геолого-геофизическая база данных по скважинам Мутновского парогидротермального месторождения, включающая архивные материалы ГИС, литологические описания, стратиграфические отбивки, интервалы интрузий, зоны дробления и данные бурения.

2. По данным ГК условно выделены верхняя зона туфовых разностей, переходная зона гидротермально изменённых пород и нижележащая предполагаемая зона резервуара.

3. Переходная зона повышенных и изменчивых значений ГК может рассматриваться как возможный элемент покрышки, или флюидоупора; положение поглощений ниже этой зоны является косвенным аргументом в пользу её экранирующей роли.

4. Качественное сопоставление с МТЗ показывает согласование выделенных по ГИС границ с положением низкоомного горизонта, однако из-за различия масштабов методов не является окончательным подтверждением.

5. Построенная поверхность подошвы флюидоупора может использоваться для сопровождения бурения и предварительного прогноза кровли резервуара, но требует уточнения по новым скважинам и расширенному комплексу ГИС.

Список литературы

1. *Блукке П.П.* Отчет о результатах предварительной разведки на участке Дачном Мутновского месторождения парогидротерм с подсчетом запасов теплоносителя для обоснования проекта строительства первой очереди геотермальной электростанции мощностью 50 МВт / *П.П. Блукке, Г.М. Асаулов, Н.П. Асаулова, С.В. Остапенко* // ПГО «Сахалингеология». 1987. 5500 с. Фондовый отчет.

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. *Ganefianto N.* Geologic Modeling Workflow for Volcanic Hosted Geothermal Reservoirs: Case Study from Salak Geothermal Field / *N. Ganefianto, J. Stimac, L. Sirad-Azwar, R. Pasikki* // Proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University. 2016.

4. *Павлова В.Ю.* Геологическое строение геотермального резервуара – участок Дачный – Мутновского месторождения парогидротерм по данным гамма-каротажа скважин // Молодой ученый. 2009. № 9 (9). С. 40–42.

5. *Павлова В.Ю.* Уточнение геологического строения Дачного участка Мутновского месторождения парогидротерм по данным интерпретации геофизических исследований в скважинах // Молодой ученый. 2010. № 8 (19). Т. 1. С. 194–201.

УДК 550.341.5

Инверсионное трехмерное термогидродинамическое моделирование условий формирования Северо-Мутновской гидротермальной системы (Камчатка, Россия)

А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, О.О. Усачева

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

Создана трехмерная термогидродинамическая модель 13×27 км в плане, по вертикали от −4 км до топографической поверхности (объем 1699 км³), состоящая из 9828 элементов. Для калибровки модели использованы данные по температуре, пьезометрической поверхности, расходам и концентрациям NaCl. С применеием инверсионного iTOUGH2-EWASG моделирования получены оценки времени формирования системы, мощности тепловых источников магматического происхождения и водного питания. Моделирование подтверждает наличие потенциально продуктивного высокотемпературного резервуара в северо-восточном секторе Мутновского вулкана.

Inverse Three-Dimensional Thermohydrodynamic Modeling of the Formation Conditions of the Severo-Mutnovsky Hydrothermal System (Kamchatka, Russia)

Alexey V. Kiryukhin, Andrey Yu. Polyakov, Olga O. Usacheva

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

A 3D thermohydrodynamic (THD) model was constructed with a plan area of 13×27 km, extending vertically from −4 km to the topographic surface (total volume 1699 km³), and consisting of 9828 elements. The model was calibrated using data on temperature, piezometric surface, flow rates, and NaCl concentrations. Inverse iTOUGH2-EWASG modeling yielded estimates of the system formation time, the power of magmatic heat sources, and the water recharge. The modeling confirms the presence of a potentially productive high-temperature reservoir in the northeastern sector of the Mutnovsky volcano.

Введение

В данной работе рассматривается термогидродинамическая (3D ТГД) модель Северо-Мутновской гидротермальной системы (рис. 1) с калибровкой по данным температуры, давления (пьезометрического уровня) и химического состава (NaCl) по доступным скважинам и значимым термопроявлениям Мутновского геотермального района.

Концептуальная модель

Водное питание обеспечивается таянием ледников в кратере и инфильтрацией воды в постройку Мутновского вулкана (выше +1500 м абс.), что обосновано данными по изотопному составу δD, $\delta^{18}O$ скважин и горячих хлоридно-натриевых источников [1]. Расход циркуляции составляет не менее 80 кг/с. Система проницаемых каналов включает жерло влк. Мутновский-3 (не используется магмой последние 4 тыс. лет), глубина проникновения метеорных вод достигает −6 км абс. На глубине водные потоки перенаправляются в ССВ направлении по структурным поверхностям, из которых наиболее доказательной является кровля домелового фундамента, закартированная по гравиметрическим данным [2] в диапазоне глубин от −4 до −3 км абс.

Мутновский вулкан является источником инжекций магмы, обеспечивающих тепловое питание гидротермальной системы. Последние 5 тыс. лет активность связана с

инжекциями магмы и дегазацией в «активной воронке» (Мутновский-4), на Донном и Верхнем полях (Мутновский-3). Инжекции, осуществляющиеся в форме даек и силлов, идентифицированы как плоско-ориентированные кластеры землетрясений (2009–2026) в северо-восточном секторе вулкана на площади около 60 км² [3]. Тепловая мощность магматических инжекций оценивается по сейсмическим данным в 405 МВт [4], с учетом неопределенности состава магм – в диапазоне 300–1500 МВт.

Для верификации концептуальной модели использована программа iTOUGH2-EWASG [5, 6]. Модуль EWASG описывает геотермальный флюид как трехкомпонентный (вода, NaCl, CO_2) двухфазный, что соответствует ожидаемому диапазону ТГД-условий.

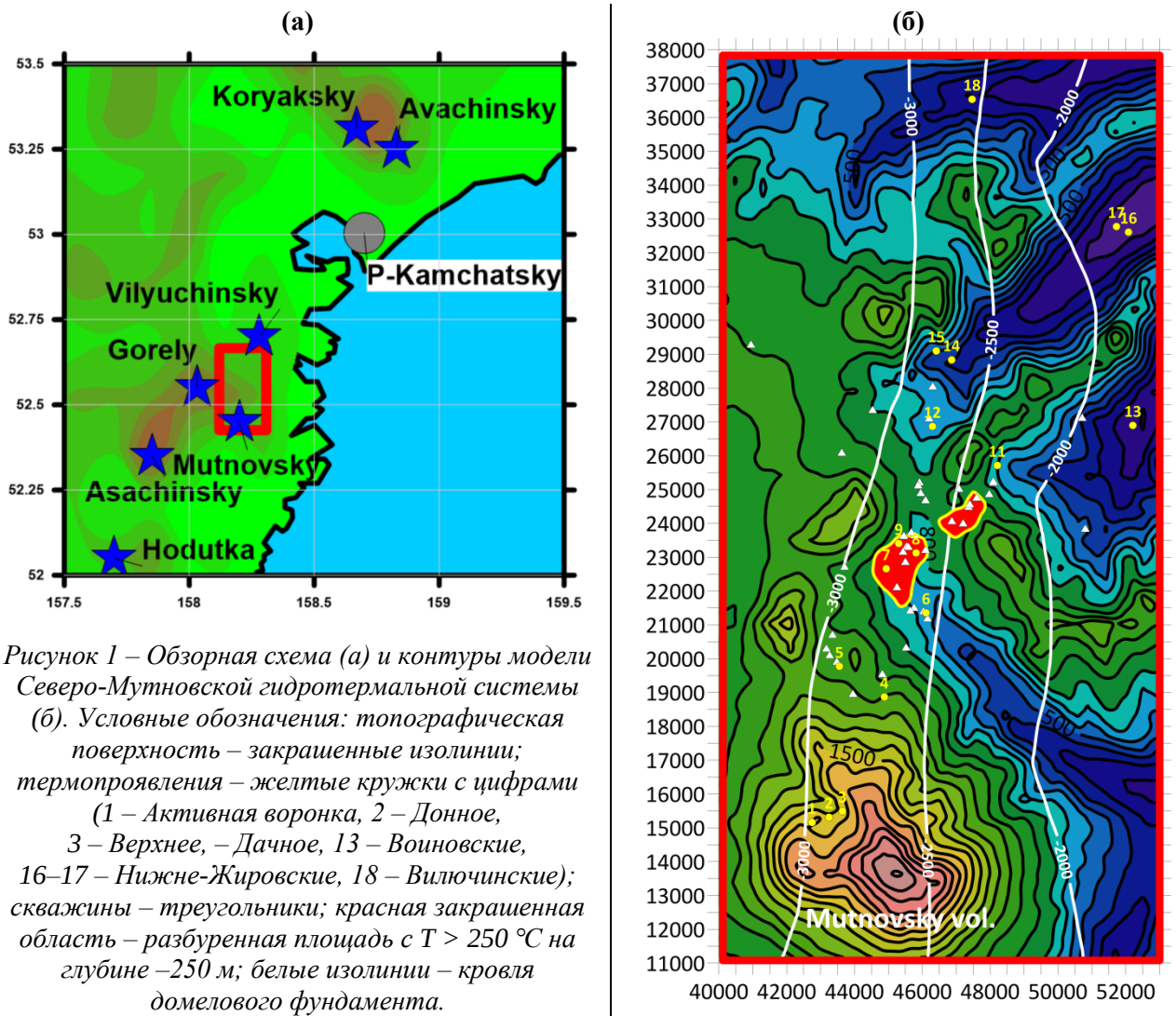


Рисунок 1 – Обзорная схема (а) и контуры модели Северо-Мутновской гидротермальной системы (б). Условные обозначения: топографическая поверхность – закрашенные изолинии; термопроявления – желтые кружки с цифрами (1 – Активная воронка, 2 – Донное, 3 – Верхнее, – Дачное, 13 – Воиновские, 16–17 – Нижне-Жировские, 18 – Вилючинские); скважины – треугольники; красная закрашенная область – разбуренная площадь с T > 250 °C на глубине –250 м; белые изолинии – кровля домелового фундамента.

Сборка 3D ТГД модели

Модель (9828 элементов) охватывает область 13.0×27.0 км (объем 1699 км³) в вертикальном диапазоне от −4000 м до топографической поверхности. Использована семислойная прямоугольная сетка 26×54×7, размер базового элемента 500×500×500 м. Поверхность кровли домелового фундамента представлена слоем мощностью 200 м (желтая заливка на рис. 2). Зонирование включает домены: ROCK1 (вмещающие породы), BASE1 (фундамент, фоновый тепловой поток 60 мВт/м²), DUMMY (приповерхностные элементы, P = 1 бар, T = 10 °C), KSURF (флюидопроводящая кровля фундамента), RESER и RESE2 (высокотемпературный и среднетемпературный резервуары), RECHG и RECH2 (области водного питания), HEATM (зона магматических инжекций), BCSEA (прибрежная разгрузка в океан 260 м ниже уровня моря, P = 26 бар) (рис. 2).

Данные для калибровки

Калибровка проводилась по четырем основным наборам данных: 1) Температурное поле: 60 репрезентативных калибровочных точек, полученных путем 3D сплайновой аппроксимации 450 замеров (забои скважин после восстановления, горячие источники, фумарольные поля и фоновая температура поверхности 10 °C). 2) Пьезометрическая поверхность: из-за двухфазного состояния теплоносителя в резервуаре калибровка по давлению выполнялась через задание граничных условий самоизлива для 4-х групп Cl-Na источников на отметке −250 м. 3) Расходы разгрузок: суммарные расходы трех активных групп источников: Воиновские (V) – 22 кг/с, Нижне-Жировские (NZ) – 36 кг/с, Вилючинские (VL) – 35 кг/с. 4) Гидрохимия (NaCl): концентрации хлоридов, пересчитанные на пластовые условия: Термальные источники: 220 ppm (V), 296 ppm (NZ), 329 ppm (VL). Добычные скважины: 330 ppm (скв. 029W), 301 ppm (скв. 4E), 234 ppm (скв. 037), 229 ppm (скв. 048).

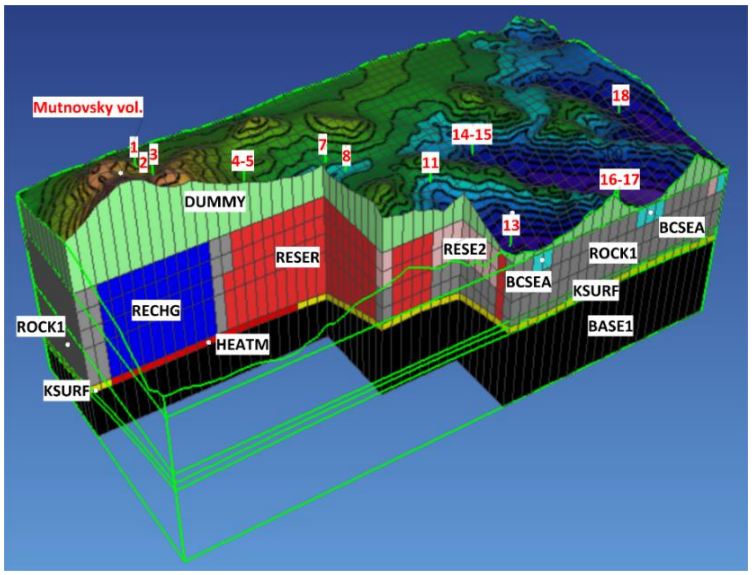


Рисунок 2 – Зонирование 3D ТГД модели Северо-Мутновской гидротермальной системы

Инверсионное моделирование

Оцениваемыми параметрами при проведении инверсионного моделирования являлись проницаемости K1 и K2 активного пространства, тепловая мощность магматических источников q, параметры пористости Ф. Всего рассмотрено 10 вариантов моделирования, ключевые варианты приведены в табл. 1, где варианты #2C и #2E (выделены жирным шрифтом) по показателям невязок (ΔT, ΔQ, ΔNaCl) являются наилучшими.

Таблица 1. Ключевые варианты инверсионного моделирования. Показаны невязки вариантов модели с калибровочными данными: по температуре ΔT, по расходу разгрузок ΔQ, по концентрации ΔNaCl

Вариант	**Оцениваемые параметры**	**ΔT, °C**	**ΔQ, кг/с**	**ΔNaCl, г/л**
#2	q; RECHG = 200 кг/с	−30.0	+44.2	+6.5
#3	q; RECHG = 100 кг/с	+30.3	+15.7	+8.4
#4	q, K1	−17.3	+10.2	+8.8
#4A	q, K1, K2	−17.3	+10.3	+8.8
#6A	q, K1, K2; t = 50 тыс. лет	−57.1	−7.0	+1.6
#8	q, K1, K2; без магм. Cl	−33.0	−0.3	+2.7
#2A	Ф (RESER, RECHG)	−14.6	+49.6	+5.8
#2C	**Ф, q**	**−24.4**	**+26.2**	**+0.005**
#2E	**прямое: Ф = 0.013; q = 1520 МВт**	**−1.2**	**+3.4**	**+0.43**

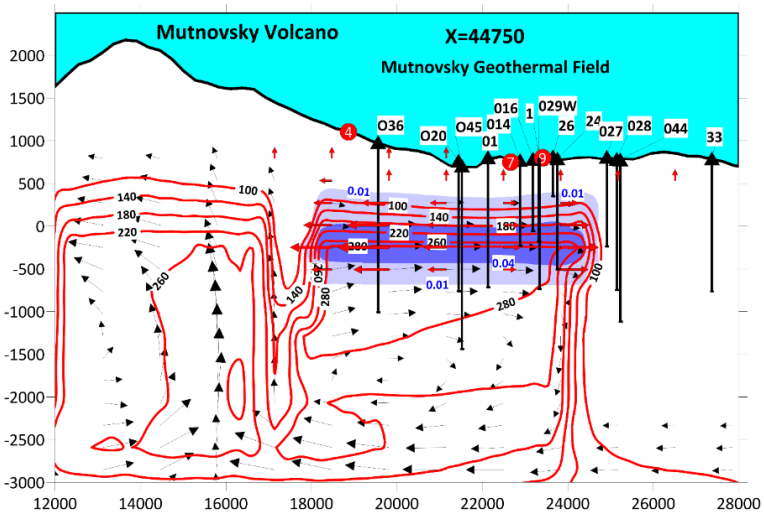


Рисунок 3 – Изолинии температуры (красные), насыщения газовой фазой Sg (синие области), массовые потоки флюида (черные тонкие стрелки) и газовой фазы (красные толстые стрелки)

Результаты и обсуждение

Заключительный вариант моделирования (#2E) при водном питании 100 кг/с, пористости 0.013 и мощности тепловых источников 1520 МВт (6.23 МВт/элемент) за 4.95 тыс. лет обеспечивает минимальные невязки: $\Delta T = -1.2$ °C, $\Delta Q = 3.4$ кг/с, $\Delta NaCl = 0.43$ г/л. На вертикальном разрезе (рис. 3) показано, что продуктивный резервуар находится в состоянии слабого кипения (Sg = 0.01–0.04) при T = 270–280 °C. Область водного питания под вулканом прогрета за счет свободной конвекции до 220–250 °C, несмотря на поглощение 100 кг/с холодной воды.

Заключение

Установлено время формирования Северо-Мутновской гидротермальной системы до 50 тыс. лет, с наиболее активной фазой в последние 5 тыс. лет. Ключевыми параметрами, обеспечивающими калибровку, являлись мощность тепловых источников магматического происхождения ~1500 МВт (контролирует температуру); средняя пористость циркуляционной системы ~0.01 (контролирует разбавление NaCl и время водообмена); величина водного питания ~100 кг/с (контролирует расходы разгрузок). Отсутствие значимых утечек из гидротермальной системы во вмещающие породы подтверждает её замкнутый характер. Моделирование подтвердило наличие потенциально продуктивного высокотемпературного резервуара в северо-восточном секторе Мутновского вулкана, что имеет важное практическое значение для размещения новых разведочных скважин. В будущих исследованиях планируется привлечение данных по давлению в наблюдательных скважинах (30, 012) для уточнения проницаемости и регуляризация весовых коэффициентов невязок различной природы.

Работа выполнена по теме FWME-2024-0007 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН с использованием данных уникальной научной установки «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга РФ» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

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

2. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / Ред. *Ю.П. Масуренков*. М.: Наука, 1980. 172 с.

3. *Kiryukhin A.V.* Magma fracking and production reservoirs beneath and adjacent to Mutnovsky volcano based on seismic data and hydrothermal activity / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, P.O. Voronin et al.* // Geothermics. 2022. Vol. 105. P. 102474. DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102474.

4. *Polyakov A.Yu.* Three-Dimensional Thermohydrodynamic Model of the Mutnovsky Magma–Hydrothermal System / *A.Yu. Polyakov, A.V. Kiryukhin* // Journal of Volcanology and Seismology. 2026. Vol. 20. №. 1. pp. 204–210. DOI: 10.1134/S074204632670003X

5. Finsterle S. iTOUGH2 V7.0 Command Reference. Rep. LBNL-40041 rev. Lawrence Berkeley Natl. Lab. 2014.

6. *Pruess K.* TOUGH2 user's guide, Version 2.0. Rep. / K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab. 1999.

УДК 553.078.2

Практическое значение литологических и минералого-геохимических исследований геотермальных систем, новые данные (Паужетский район, Камчатка)

С.Н. Рычагов[1], Е.И. Сандимирова[1], А.В. Сергеева[1], О.В. Кравченко[1], М.С. Чернов[2], Г.А. Пальянова[3]

[1]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*
rychsn@kscnet.ru
[2]*Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3]*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

На основании детальных геологических исследований геотермальных систем Паужетского района Южной Камчатки рассмотрены составы, свойства и механизмы образования аргиллизированных горных пород, гидротермальных глин и минеральных осадков, образующихся в зоне разгрузки термальных вод под влиянием глубинного щелочного флюида. Показано практическое значение изучения строения аргиллизитов и минеральных рудных ассоциаций, условий транспорта и накопления металлов в геотермальных средах.

Practical Value of Lithological and Mineralogical Geochemical Researches of Geothermal Systems, New Data (Pauzhetsky Area, Kamchatka)

Sergei N. Rychagov[1], Elena I. Sandimirova[1], Anastasia V. Sergeeva[1], Olga V. Kravchenko[1], Mikhail S. Chernov[2], Galina A. Palyanova[3]

[1]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*
rychsn@kscnet.ru
[2]*Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[3]*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy RAS, Novosibirsk, Russia*

On the basis of detailed geological researches of geothermal systems of Pauzhetsky area of the Southern Kamchatka the structures, properties and mechanisms of formation of the argillized rocks, hydrothermal clays and mineral precipitation, which are formed in an unloading zone of thermal waters under the influence of deep alkaline fluid, are considered. The practical value of studying the structure of argillizites and mineral ore associations, conditions of transport and accumulation of metals in geothermal environments are shown.

Введение

Геотермальные системы традиционно рассматриваются с позиции извлечения тепловой и электрической энергии. При разведке и эксплуатации геотермальных месторождений обычно используется широкий комплекс научных исследований с целью оценки температурных условий в недрах систем, выделения геотермальных резервуаров, картирования зон, проницаемых для теплового потока. Авторы доклада обращают внимание на другие практические аспекты изучения современных гидротермальных систем и геотермальных месторождений на примере Паужетского (Паужетско-Камбально-Кошелевского) района Южной Камчатки: минералообразование в зоне аргиллизации горных пород как начальный этап формирования рудных месторождений; сорбционные процессы в минеральных отложениях, образующихся при утилизации геотермального теплоносителя; разработку новых методик экспресс-анализа метасоматитов при разведочном и/или эксплуатационном бурении; исследование новообразованных минеральных ассоциаций с точки зрения прогноза рудоносности вулканогенных формаций; и др.

Фактический материал и его обсуждение

Аргиллизированные породы и гидротермальные глины занимают особое место в ряду измененных пород областей современного вулканизма. Они образуются в зонах разгрузки термальных вод и парогазового флюида и являются чутким индикатором эволюции гидротермальных систем, трассируют проницаемые для теплового потока трещинно-брекчиевые структуры; аргиллизация горных пород часто сопровождается формированием золото-серебряных, медно-молибден-порфировых, эпитермальных полиметаллических и др. месторождений [1–3]. Авторским коллективом при детальном изучении термальных полей с помощью бурения картировочных скважин и проходки шурфов выделены геотермальные системы, в которых длительная разгрузка щелочных термальных вод приводит к формированию в основании толщи глин мощного (≥ 5–10 м) горизонта «пластичных глин» [4]. Показано, что этот горизонт служит водоупором и тепловым экраном в структуре геотермальной системы, к нему приурочен комплексный геохимический барьер; в подошве горизонта образуются кремнисто-карбонатные жильные зоны с сульфидами цветных металлов, фосфатами РЗЭ, интерметаллидами и самородными металлами [5], рис. 1. В кремнистых «плащах», по-видимому, образующихся на начальных этапах развития геотермальной системы, также диагностирован широкий спектр рудных минералов, включая фосфаты иттрия, сульфиды Fe и Cu, интерметаллические соединения, фосфид железа [6]. Полученные данные свидетельствуют в пользу влияния на верхние горизонты геотермальной системы глубинного восстановленного металлоносного флюида и представляют большой интерес для реконструкции первых этапов формирования рудных месторождений (как правило, начало рудообразования затушевано последующими тектоническими, метаморфическими, гидротермально-метасоматическими и др. процессами и недоучет этого фактора часто приводит к принципиальным ошибкам при разведке и эксплуатации месторождений).

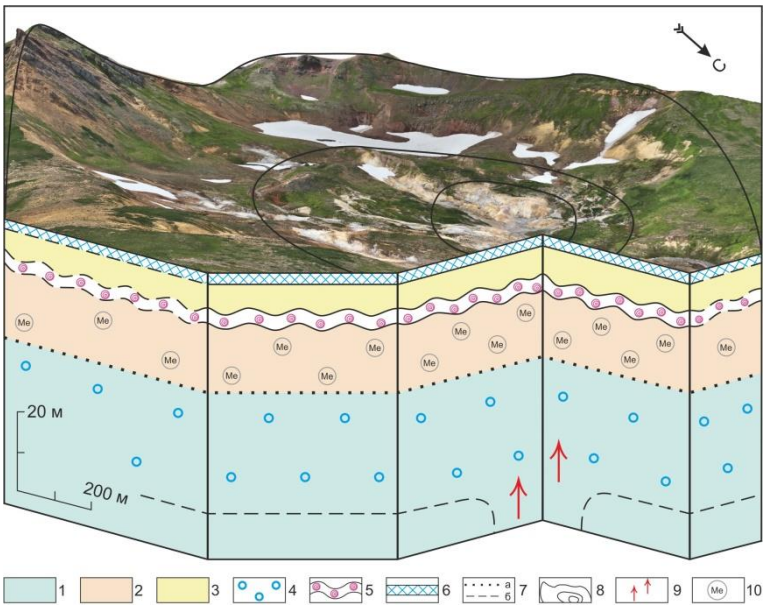


Рисунок 1 –
Геолого-геохимическая модель Южно-Камбальной геотермальной системы.

Условные обозначения:
1 – вмещающие андезибазальты,
2 – аргиллизированные породы,
3 – гидротермальные глины,
4 – близповерхностный геотермальный резервуар,
5 – зона карбонатизации и образования конкреций сложного состава,
6 – кремнистые отложения,
7 – границы горизонтов,
8 – границы морфоструктур,
9 – восходящий тепловой поток,
10 – рудные ассоциации

Эксплуатация высокотемпературных геотермальных месторождений на Камчатке сопровождается утилизацией отработанного геотермального теплоносителя в форме сброса сепарата на рельеф дневной поверхности. В результате на Паужетском геотермальном месторождении, начиная с 1960-х годов, сформировались минеральные отложения в виде «плащей» протяженностью ≥500 м, мощностью до 0.8–1 м и шириной ≥5–10 м, выполняющие распадки и долины ручьев. Нами закартировано 10 таких «плащей». Первоначально считалось, что отложения состоят исключительно из минералов кремнезема (опала, тридимита и кристобалита, на отдельных участках раскристаллизованных в халцедон). Но исследования последних лет показали, что в начале сброса термальных вод из сепараторов скважин минеральные осадки состоят из аморфного низкотемпературного K-Na-Ca цеолита (морденита) с примесью опала [7]. Далее по простиранию отложения становятся полностью

кремнистыми (рис. 2). Примечательной особенностью состава осадков в начале сброса термальных вод является геохимическая аномалия серебра. Более того, была установлена минеральная форма Ag – низкотемпературный сульфид акантит, образующийся непосредственно из термальных вод при сорбции водорастворимых соединений Ag аморфной опал-морденитовой смесью. Детальное изучение цеолитов, а также рудных минералов в близповерхностной зоне аргиллизации горных пород Паужетского месторождения показало принципиальную сходимость условий и направленности минерало- рудообразующих процессов в зоне разгрузки парогидротерм и в недрах системы, где породы представлены рудовмещающими пропилитами и вторичными кварцитами [4, 8]. Полученный результат имеет большое практическое значение для прогноза рудоносности вулканогенных формаций, а также оценки геотехнологических свойств новообразованных минеральных осадков.

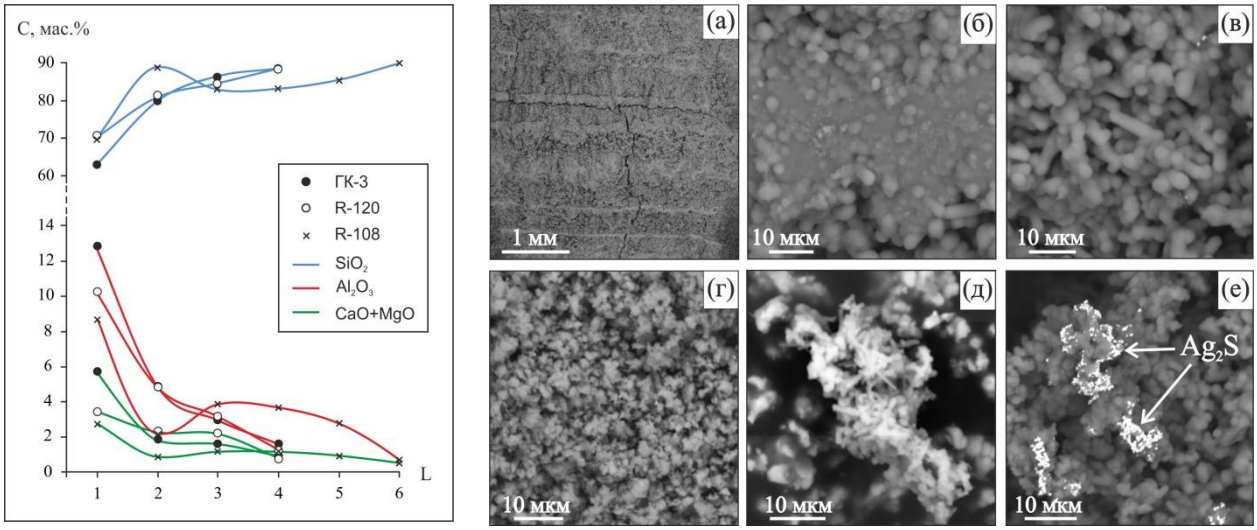


Рисунок 2 – Распределение основных компонентов химического состава цеолит-кремнистых отложений скважин ГК-3, R-120 и R-108 Паужетского геотермального месторождения по простиранию «плащей» (L) – диаграмма слева; и микростроение этих осадков в начале сброса термальных вод по данным микрозондовых исследований (а – слоистая структура, б-д – различные другие структуры цеолитов, е – пластинки акантита на агрегате цеолита)

В основании толщи гидротермальных глин Южно-Камбальной геотермальной системы выделены карбонатные конкреции сложного химического и минерального составов: слои арагонита чередуются с микрослоями, включающими оксиды Fe и Si, сульфаты Ca и Ba, сульфиды Fe и цветных металлов, карбонаты Fe и Mn, Si-Fe-Mn образования, соединения азота, фосфаты Ca и других металлов. Конкреции образуются вследствие внедрения щелочных металлоносных растворов в открытые полости (разуплотненный горизонт, см. рис. 1) в основании толщи глин, последующего вскипания, охлаждения и пересыщения растворов относительно основных компонентов состава (гидрокарбоната, ортокремниевой коллоидной и растворенной кислоты, сульфата и аммония). Разнообразие, определенная последовательность и повторяемость структур свидетельствует в пользу многостадийного пульсационного характера образования конкреций. Таким образом, данные карбонатные конкреции являются индикатором динамики глубинного металлоносного флюида. Разнообразие в строении этого каменного материала (выделяются слоистые, массивные, колломорфно-полосчатые, глобулярные, крустификационные, радиально-лучистые и др. структуры), рис. 3, привлекает к нему внимание в качестве интересных коллекционных образцов для геологических музеев. В частности, три крупных образца конкреций были подготовлены и переданы в музей Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

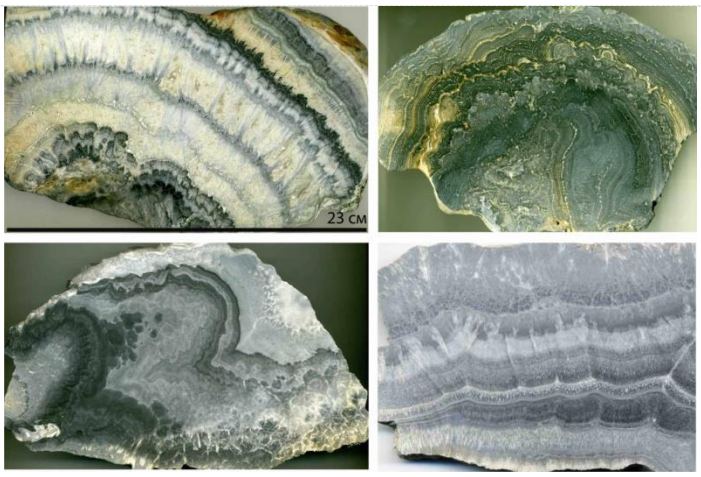


Рисунок 3 – Структурно-текстурные особенности карбонатных конкреций сложного состава, музейные образцы (Южно-Камбальное Центральное термальное поле). Размер образцов по удлинению от 20 до 25 см

Заключение

Изложенные результаты востребованы при поисках, разведке и эксплуатации геотермальных и рудных месторождений; разработке новых технологий извлечения металлов из водных растворов, минеральных осадков и горных пород; прогнозе рудоносности вулканогенных формаций; оценке влияния утилизации геотермального теплоносителя на окружающую среду.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН № FWME-2025-0001.

Список литературы

1. *Дворник Г.П.* Золоторудные метасоматические формации Центрально-Алданского района // Литосфера. 2012. № 2. С. 90–105.

2. *Марущенко Л.И.* Кварц-серицитовые метасоматиты и аргиллизиты Au-Mo-Cu месторождения Песчанка (Чукотка) / *Л.И. Марущенко, И.А. Бакшеев, Е.В. Нагорная и др.* // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 3. С. 239–252. DOI: 10.7868/S001677701503003X.

3. *Набоко С.И.* Металлоносность современных гидротерм в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука. 1980. 198 с.

4. *Рычагов С.Н.* Минералообразование на Восточно-Паужетском термальном поле (Южная Камчатка) как отражение влияния глубинного щелочного флюида и эпитермальной рудообразующей системы / *С.Н. Рычагов, Е.И. Сандимирова, М.С. Чернов и др.* // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 2. С. 255–279. DOI: 10.15372/GiG2022211.

5. *Rychagov S.N.* The Structure and Origin of the South Kambalny Central Thermal Field, Kamchatka / *S.N. Rychagov, O.V. Kravchenko, E.I. Sandimirova et al.* // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. Vol. 19. No. 5. pp. 411–434. DOI: 10.1134/S0742046325700277.

6. *Пальянова Г.А.* Необычная рудная минерализация кремнистых отложений Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка) / *Г.А. Пальянова, С.Н. Рычагов, Е.Н. Светова и др.* // ДАН. 2024. Т. 519. № 1. С. 80–89. DOI: 10.1134/S1028334X24603535.

7. *Сергеева А.В.* Минералого-геохимические особенности цеолит-кремнистых отложений Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка) / *А.В. Сергеева, С.Н. Рычагов, О.В. Кравченко и др.* // Вулканология и сейсмология. 2024. № 1. С. 38–55. DOI: 10.1134/S0742046323700422

8. *Сандимирова Е.И.* Цеолитовая минерализация в аргиллизитах Восточно-Паужетского термального поля как индикатор разгрузки щелочного флюида в современной гидротермальной системе (Южная Камчатка) / *Е.И. Сандимирова, С.Н. Рычагов, А.В. Сергеева, В.М. Чубаров* // Вулканология и сейсмология. 2022. № 6. С. 42–62. DOI: 10.31857/S020303622060086

УДК 552.2+552.3

Идентификация конечных членов магматических серий моногенного конуса Зеленый, Малко-Петропавловская зона поперечных дислокаций, Камчатка

С. Дж. Вивек[1], О.В. Бергаль-Кувикас[1,2], Е.Ю. Плутахина[2]

[1]*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия*
kuvikas@mail.com
[2]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Многочисленные проявления моногенного вулканизма локализованны в пределах Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций (МПЗ), находящейся на границе между северным и южным сегментом Камчатки. Моногенный шлаковый конус Зелёный, расположенный в южной части МПЗ, представляет собой один из представительных примеров формирования питающих систем моногенного вулканизма в субдукционных обстановках. В данной работе продемонстрированы данные по содержанию основных оксидов и микроэлементов в изверженных породах конуса Зелёный. Проведено сравнение с данными по соседним вулканам, таким как конус Шлаковая, кальдера Карымшина и другими моногенными вулканами, расположенными вдоль МПЗ. Состав пород конуса Зелёный позволяет выделить две отдельные серии: серию I (мафитовую) и серию II (фельзитовую). Понимание происхождения отдельных моногенных конусов важно для выявления зон с высоким риском извержения в будущем.

Identifications of End-Members of Magmatic Series of Monogenetic Cone Zelenyi, Malko-Petropavlovsk Zone of Transverse Dislocation, Kamchatka

S.J. Vivek[1], Olga V. Bergal-Kuvikas[1,2], Ekaterina Yu. Plutakhina[2]

[1]*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*
[2]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

The Malko-Petropavlovsk zone of transverse dislocations (MPZ) on the Kamchatka peninsula, which separates southern and northern Kamchatka, hosts numerous monogenic volcanic manifestations.The study of the monogenetic cinder cone, Zelenyi, located in the southern part of MPZ, is a representative example of the formation magma plumbing systems in monogenetic volcanic activity in subduction zones. Here we present the major oxide and trace element variation of erupted products from Zelenyi cone and their corelation with neighbouring volcanism such as Shlakovaya cone, Karymshina caldera, and several other monogenic volcanoes along MPZ. The composition of Zelenyi sample defines two distinct compositional series: Series-I (Mafic) and Series-II (Felsic). Understanding the nature of such individual monogenic cones are significant for identifying zones with imminent eruption potential.

Introduction

The Kamchatka peninsula sits on the overriding plate of North-West Pacific subduction zone with a long history of accretionary events, such as Late Cretaceous Achaivayam-Valagin arc terrane in Early Eocene and then accretion of Campanian-Eocene Kronotsky arc terrane at 6–10 Ma [1, 2]. The MPZ was formed as the extension of the deep Avachinsky transform fault system, which forms a geodynamic division between deep earthquake-prone Southern Kamchatka and their absence to the north [3, 4]. MPZ with exposed dense fractures feeds numerous monogenic cinder cones in the south with northern segment comprising of extrusive domes [5] (Fig. 1). Recent findings using seismic tomographical study demonstrated the presence of small-scale low-velocity anomalies at shallow depths in the northern (10−15km) segment and southern (<10 km) segment of MPZ, raising concerns of future hazards [6]. The general nature of volcanism across the MPZ is characterised by evolved extrusive domes neighbouring the stratovolcanoes and more primitive cinder cones along the Paratunka and Vilyui river valleys [6].

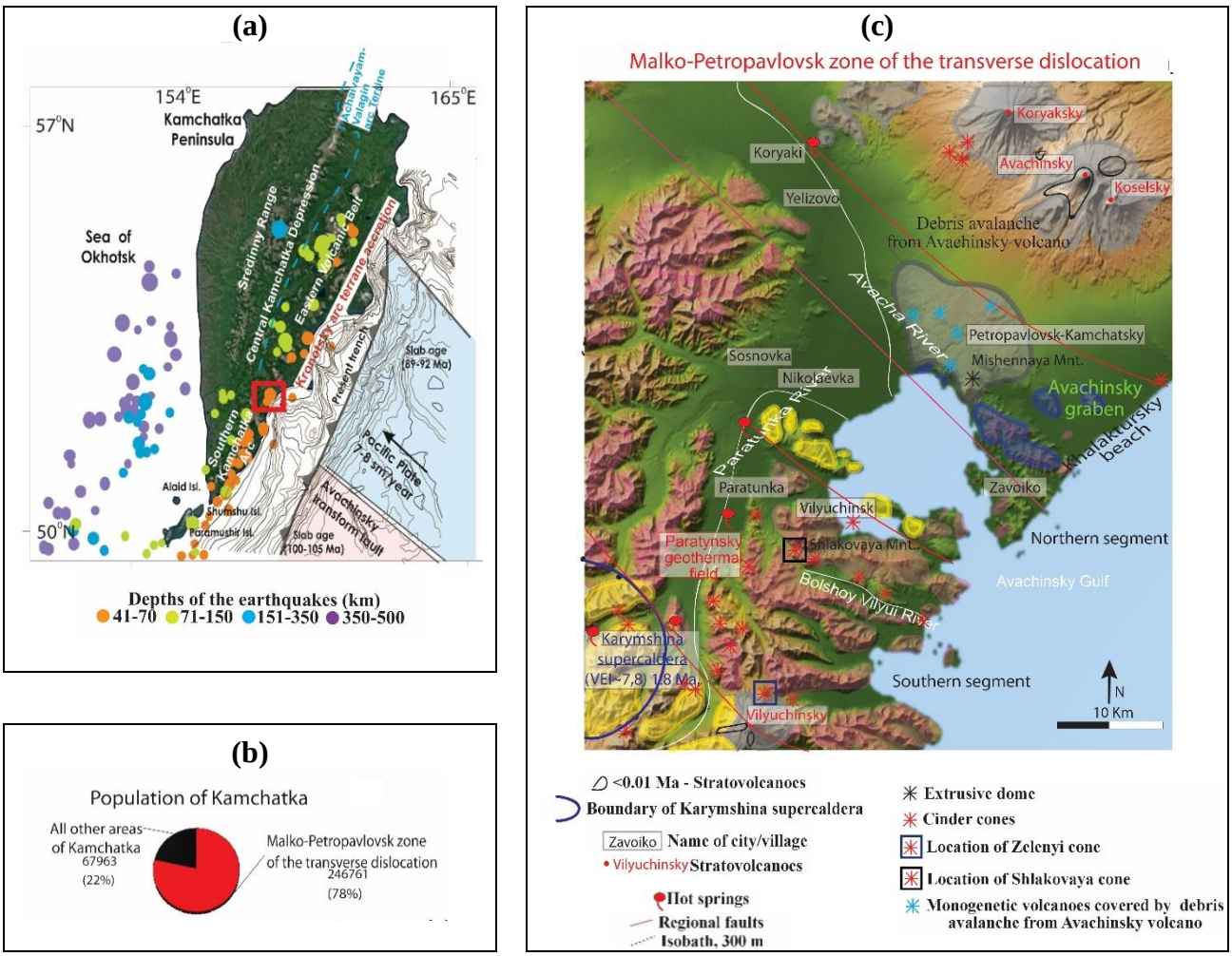


Figure 1 – (a) Geodynamic setting of Kamchatka (b) Pie chart showing population density of Kamchatka Vs MPZ (c)Map showing the location of Zelenyi cone, Shlakovaya cone and extrusive domes in MPZ with location of Karymshina super caldera, after [5]

Zelenyi monogenic cinder cone

Zelenyi monogenic cinder cone located on the southern section of MPZ represent one such cone exposed in volcanic field along the Paratunka river valley. Here we discuss the major element and whole rock data from Zelenyi cone to understand its magmatic evolution and compare it with published data sets of Shlakovaya cone, extrusive domes and data from different sections of monogenic fields in MPZ, which is required for reconstructing the volcanism along this transverse segment. Geochemistry of published data sets from Karymshina volcano which neighbours the Zelenyi cone is also analysed to investigate any possible corelations.

The samples collected from lava flow and lava bomb segments of the Zelenyi cone show drastic variation in their geochemistry, showing primitive basaltic to evolved rhyolitic nature with SiO_2 ranging from 49 wt% to 74 wt%, which can be corroborated by Mg# values (19−37) and negative binary trends of MgO, CaO and TiO_2 (Fig. 2). Even though the common evolutionary trend suggests fractional crystallization process, it alone cannot explain such a major compositional shift. Trace element behaviour of Zelenyi cone shows contrasting nature with evolved sample showing crustal contamination with high Th/La values, suggesting ponding of the magma before emplacement. The REE spider diagram displays classical arc signatures and points out significant variations in REE values, showing evolved and primitive natures.

Geochemical corelations

We demonstrate here, the coexistence two magma series, with series-I of mafic type and series-II of evolved felsic type (Fig. 2). Series-I have geochemistry of 49 wt% SiO_2, 6 wt% MgO and 3 wt% $Na_2O + K_2O$ with LREE enriched, slight HREE depleted REE pattern, elevated incompatible elements (Ce, Ba, Th, U) and Sr (446 ppm), Cr (201 ppm), Nd (13 ppm) values. Series-II is characterized by felsic features having 74 wt% SiO_2, 0.6 wt% MgO and 6 wt% $Na_2O + K_2O$ with typical arc magmatic trace element behaviour, including negative Sc (2 ppm) and Ni (4 ppm) anomalies and enriched Rb (37 ppm) and Ba (573 ppm) values compared to series-I.

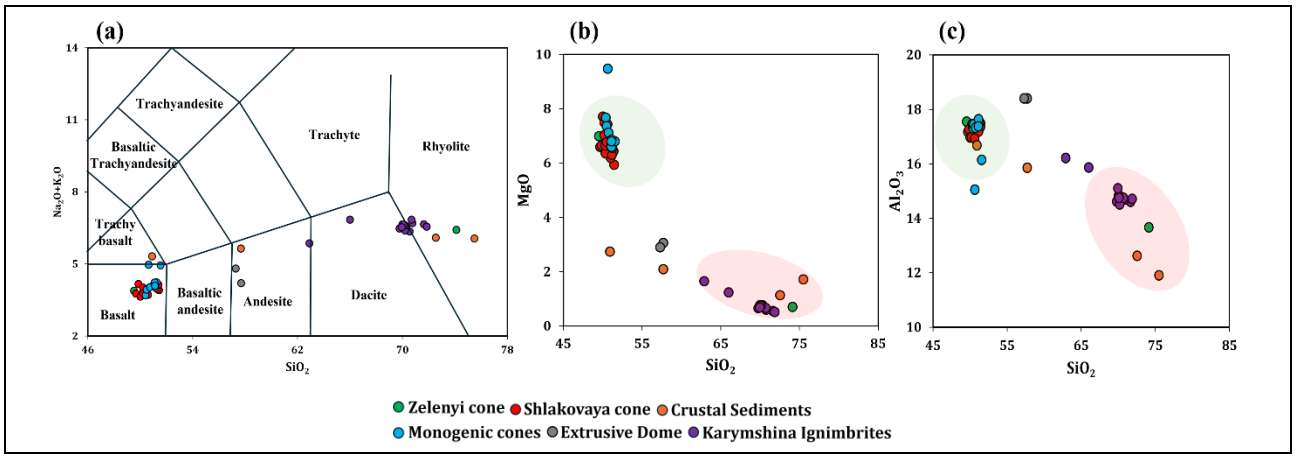


Figure 2 – Total alkali-silica (TAS) diagram (a) and Major oxide variation diagrams for Zelenyi cone and it's neighbouring volcanism (b) and (c). Green region: clustering of samples from Zelenyi cone (lava flow), Shlakovaya cone from [7] and monogenic cone from [5], Pink shade region: Karymishina ignimbrites from [8] and Zelenyi cone (lava bomb)

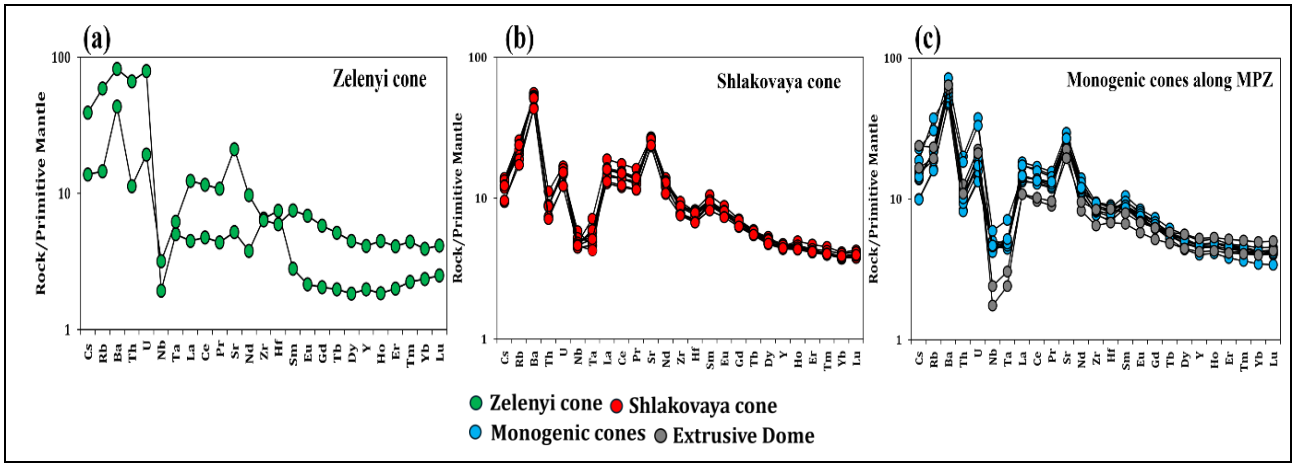


Figure 3 – Trace element variation daigrams normlaized to prtimitive for Zelenyi cone and it's neighbouring volcanism. The Shlakovaya cone data from [7] and monogenic cones and extrusive dome data of MPZ from [5]

A geochemical comparison of Zelenyi cone with known data from neighbouring volcanism showed two distinct clustered behaviour: Series-I, Shlakovaya cone and the regional data set of monogenic cones form a single cluster while Series-II samples group with Karymishina data (Fig. 2, 3). The extrusive dome samples were shown to be independent in nature with no clear corelation with other volcanisms. Such similarity also observed in REE pattern can be an indication of a genetic link between adjacent volcanic features, although enough data sets are not currently present to substantiate this speculation.

Conclusion

Our new data shown are significant for linking the evolutionary pattern of individual monogenic cones in this volcanic field and for identifying genetic links between adjacent volcanic centres. The hazardous nature of such monogenic cones along with identification of active melt zones underneath MPZ, raises the possibilities of future eruptions. MPZ, being located in the most populated city of Petropavlovsk-Kamchatsky, drives a complete scientific study on monogenic volcanoes to assess their hazard potential.

All analytical analysis were supported by the Russian Science Foundation, grant № 22-77-10019-P, https://rscf.ru/project/22-77-10019-П. The student's work supervision explains the inclusion of Vitus Bering Kamchatka State University affiliation for the second author.

References

1. *Hourigan J.K.* Eocene arc-continent collision and crustal consolidation in Kamchatka, Russian Far East / *J.K. Hourigan, M.T. Brandon, A.V. Soloviev et al.* // American Journal of Science. 2009. 309. pp. 333–396. DOI: 10.2475/05.2009.01.

2. *Lander A.V.* The origin of the modern Kamchatka subduction zone / *A.V. Lander, M.N. Shapiro* // American Geophysical Union Geophysical Monograph Series. 2007. 172. pp. 57–64. DOI: 10.1029/172GM05.

3. *Moroz Y.F* Deep structure of South Kamchatka according to geophysical data / *Y.F. Moroz, L.I. Gontovaya* // Geodynamics and Tectonophysics. 2018. 9(4). pp. 1147–1161. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0387.

4. *Gordeev E.I.* Structure of the subduction zone and volcanism in Kamchatka / *E.I. Gordeev, O.V. Bergal-Kuvikas* // Doklady of the Earth Sciences. 2022. 502. 1. pp. 21–24. DOI: 10.1134/S1028334X22020088.

5. *Bergal-Kuvikas O.* Pleistocene–Holocene monogenetic volcanism at the Malko-Petropavlovsk zone of transverse dislocations on Kamchatka: Geochemical features and genesis / *O.V. Bergal-Kuvikas, I.N. Bindeman, A.V. Chugaev et al.* // Pure and Applied Geophysics. 2022. 179(11). pp. 3989–4011. DOI: 10.1007/s00024-022-02956-7.

6. *Bergal-Kuvikas O.V.* The correlation between the crustal structure, mantle tomography and the spatial distribution of monogenic volcanism in the Malko Petropavlovsk zone of transverse dislocation, Kamchatka / *O.V. Bergal-Kuvikas, A.A. Dolgaya, N.A. Bushenkova* // New Zealand Journal of Geology and Geophysics. 2026 (submitted).

7. *Bergal-Kuvikas O.V.* Magma genesis and evolution for monogenetic volcanism in subduction setting: Trace elements, Sr-Nd-Pb isotopic features and olivine zonation constraints of basalts from Shlakovaya Mt., Malko-Petropavlovsk zone of transverse dislocation, Kamchatka / *O.V. Bergal-Kuvikas, A.V. Chugaev, Y.O. Larionova* // Bulletin of Volcanology. 2026 (submitted).

8. *Bindeman, I.N.* Isotopic and petrologic investigation, and a thermomechanical model of genesis of large-volume rhyolites in arc environments: Karymshina Volcanic Complex, Kamchatka, Russia / *I.N. Bindeman, V.L. Leonov, D.P. Colón et al.* // Frontiers in Earth Science. 2019. 6. 238. DOI: 10.3389/feart.2018.00238.

УДК 550.078.2

Строение Кошелевского вулканического массива по геоэлектрическим данным (Южная Камчатка)

С.О. Феофилактов, О.М. Самойлова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
serg415@kscnet.ru

Кошелевский вулканический массив – крупное вулканическое сооружение, которое включает в себя две мощные термоаномалии (геотермальные месторождения): Нижне-Кошелвское, Верхне-Кошелевское. На территории этих полей проведены электроразведочные работы методами ВЭЗ и МТЗ. Определены горизонты пород с контрастными удельными электрическими сопротивлениями. Выделяются области низкого удельного электрического сопротивления на глубине 500 м, непосредственно под крупными термальными полями Кошелевского вулканического массива, соответствующие наиболее обводненным и гидротермально измененным породам лавового комплекса.

Structure of the Kosheleva Volcanic Massif Based on Geoelectrical Data (South Kamchatka)

Sergey O. Feofilaktov, Olga M. Samoylova

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

The Kosheleva volcanic massif is a large volcanic structure encompassing two powerful thermal anomalies (geothermal fields): Nizhne-Koshelvskoye and Verkhne-Koshelvskoye. Electrical exploration using VES and MTS methods was conducted within these fields. Rock horizons with contrasting electrical resistivities were identified. Areas of low electrical resistivity are identified at a depth of 500 m, directly beneath the large thermal fields of the Koshelev volcanic massif, corresponding to the most water-saturated and hydrothermally altered rocks of the lava complex.

Введение

Паужетский геотермальный район включает в себя три крупных структурных элемента: Паужетское геотермальное месторождение, Кошелевский вулканический массив и Камбальный вулканический хребет.

Наибольший интерес представляют Паужетские и Кошелевские гидротермы, которые достаточно хорошо изучены. На Паужетском геотермальном месторождении пробурено порядка 50 скважин и с 1966 г. успешно работает первая в нашей стране геотермальная электростанция [1]. По выносу тепла, интенсивности и концентрированности гидротермальной деятельности с Кошелевским массивом на Камчатке может сравниться только Долина Гейзеров и такие действующие вулканы, как Мутновский и Шивелуч: вынос тепла на Нижне-Кошелевской термоаномалии Е.А. Вакин с коллегами оценивают в 25 000 Ккал/сек, Верхне–Кошелевской – 50 000 Ккал/сек [2] Массив состоит из нескольких сросшихся, в различной степени разрушенных вулканов, экструзивных куполов и субвулканических тел. Предполагается неглубокое залегание магматического очага на участке Нижне-Кошелевских парогидротерм [3].

Известно, что удельное электрическое сопротивление вулканогенных пород главным образом зависит от степени их пористости (трещиноватости) и обводнённости, что создает предпосылки к использованию методов электроразведки на геотермальных месторождениях. Полученная информация о распределении электропроводности пород с глубиной позволяет выделять геотермальные резервуары, зоны питания и циркуляции растворов в структуре месторождения.

Коллективом сотрудников структурно-геофизического отряда лаборатории геотермии Института вулканологии сейсмологии ДВО РАН на протяжение нескольких полевых сезонов проведены электроразведочные работы методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) на территории Нижне-Кошелевского термального поля, а также работы методом магнитотелурического зондирования (МТЗ) на термальных полях Кошелевского вулканического массива (рис. 1).

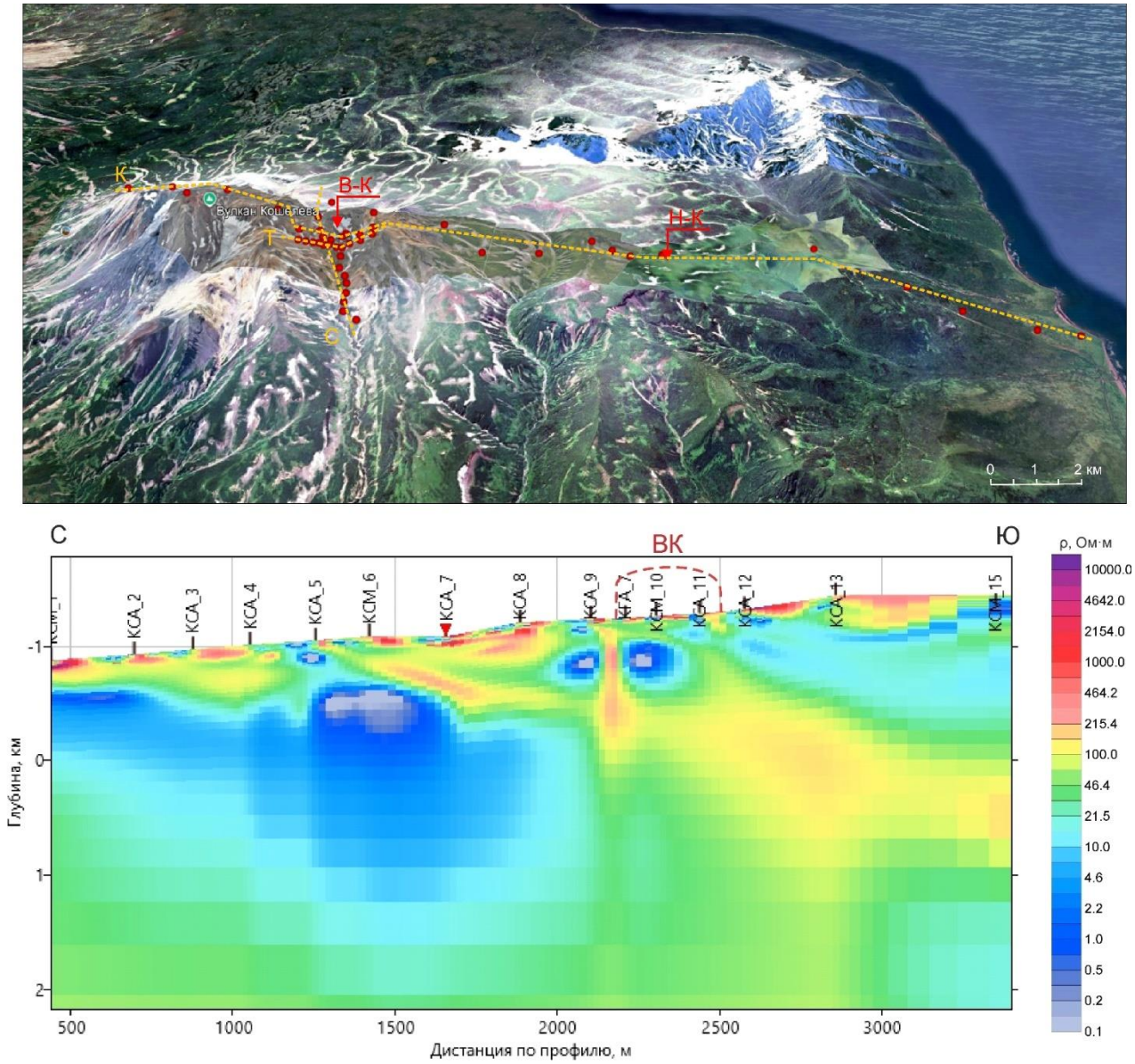


Рисунок 1 – Схема расположения точек МТЗ на территории Кошелевского вулканического массива и геоэлектрический разрез по профилю С района Верхне-Кошелевского термального поля (ВК) по магнитотеллурическим данным

Методика и аппаратура электроразведочных работ

Электроразведочные работы методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) выполнены симметричной четырехэлектродной расстановкой с использованием многофункционального измерителя МЭРИ-24 (ООО «Северо-Запад», Россия) и электроразведочного генератора АСТРА-100 (ООО «Северо-Запад», Россия). Обработка данных проведена в специализированном программном пакете IPI2win (ООО «Геотех», Россия). Измерения выполнены по двум профилям широтного и меридионального простирания, пересекающим Нижне-Кошелевское термальное поле.

Глубинные электромагнитные исследования методами магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и аудио-магнитотеллурического зондирования (АМТЗ) на этом объекте

проведены впервые. В рамках федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университеты» в Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН были приобретены два комплекса магнитотеллурических зондирований для регистрации электромагнитного поля «NORD» (ООО «Северо-Запад», Россия). Первые полевые работы этими комплексами выполнены на Нижне-Кошелевском геотермальном месторождении. Производилась регистрация электрических и магнитных компонент естественного электромагнитного поля (Ex, Ey, Hx, Hy, Hz). Магнитотеллурические исследования выполнялись двумя станциями с использованием однотипных регистраторов «NORD Plus» и двух видов датчиков регистрации компонент электрического и магнитного поля. Применялись широкополосные индукционные датчики IMS-15 с диапазоном измерений от 0.001 до 10 000 Гц в комплекте с неполяризующимися графитовыми электродами NW-4 для выполнения МТЗ и индукционные датчики IMS-05 с диапазоном измерений от 5 до 20 000 Гц в комплекте с штыревыми латунными электродами для АМТЗ. Длина измерительных электрических диполей четырехэлектродной крестообразной установки составила 60 м для АМТЗ и 100 м для МТЗ. Азимуты расстановки приемных линий выбраны 0º и 90º. Время записи станций определялось опытным путем и составило 2–2.5 часа для записей АМТЗ и 30–36 часов – для МТЗ. Обработка полученных данных проводится с использованием специального пакета программ, CalPro, EPI-KIT и MT-Corrector (ООО «Северо-Запад», Россия)

На Нижне-Кошелевском геотермальном месторождении зондирования выполнены в 24 точках по трем профилям с расстоянием между пикетами 100–250 м для АМТЗ и 500–800 м между точками МТЗ. Основной профиль А-Б проходил через три крупные термовыводящие структуры с севера на юг: палеогидротермальная система в структуре руч. Аргиллизитовый, современная система в долине руч. Гремучий, к которому приурочена Нижне-Кошелевская термоаномалия и крупная проницаемая зона трещиноватости по долине руч. Прямой. Дополнительный профиль Г-Д расположен был в верховье руч. Прямой и пересекал верхний участок Нижне-Кошелевской термоаномалии. Он состоял из пяти пунктов АМТЗ и одного МТЗ. Профиль В-Г включал четыре пункта МТЗ и характеризовал глубинную часть геотермального месторождения.

В августе 2025 года проведены измерения на площади Верхне-Кошелевской термоаномалии по 3 секущим профилям с аналогичным шагом и выполнены работы по длинному профилю (протяжённость 18 км) пересекающему Кошелевский вулканический массив. Зондирования выполнены в 43 точках (рис. 1).

Фактический материал исследований

По результатам электроразведки методом ВЭЗ построены псевдо- и геоэлектрический разрезы по профилям, пересекающим Нижне-Кошелевское термальное поле. По результатам МТЗ проведен анализ полученных кривых зондирований и построены предварительные геоэлектрические модели для Нижне-Кошелевского и Верхне-Кошелевского термальных полей.

Полученный геоэлектрический разрез Нижне-Кошелевского геотермального месторождения можно разделить на три области по удельному электрическому сопротивлению. Интерес представляет мощный проводящий горизонт с УЭС менее 10 Ом·м, который прослеживается по всему разрезу и погружается на глубину в центральной части профиля. Аналогичная зона выделяется по данным ВЭЗ в центральной части Нижне-Кошелевского термального поля. Вероятно, выделяемая область соответствует породам, насыщенным гидротермальными растворами. Горизонт выходит к поверхности непосредственно под Нижне-Кошелевским термальным полем. Ручьи на территории месторождения трассируют тектонические нарушения, им соответствуют изолинии 20–30 Ом·м на геоэлектрическом разрезе. Между руч. Гремучий и Прямой на глубине 500 м выделяется высокоомное тело, уходящее на глубину, интерпретируемое, основываясь на работе [4], как субвулканическая интрузия. Полученные результаты принципиально согласуются с данными микросейсмического зондирования [5], но существенно уточняют

строение Нижне-Кошелевской термоаномалии на глубину до 3 км. По-видимому, основной термоподводящий канал приурочен к тектоническому нарушению, которое трассируется ручьем Гремучий.

По результатам МТЗ под Верхне-Кошелевской термоаномалией выделяется локализованная область низких значений УЭС на глубине порядка 500 м, которая характеризует приповерхностный геотермальный резервуар, питающий гидротермы (рис. 1). Мощная область низких значений УЭС в северной части профиля приурочена к долине реки Шумная и обусловлена речной долиной.

Выводы

По результатам первичной обработки геоэлектрических данных определены области пониженных значений УЭС на глубине 500 м, непосредственно под крупными термальными полями Кошелевского вулканического массива. Такие участки соответствуют зонам накопления (конденсации) высокоминерализованных термальных вод. Между руч. Гремучий и Прямой на Нижне-Кошелвском месторождении на глубине 500 м выделяется тело с высокими значения УЭС, уходящее на глубину, которое соответствует субвулканической интрузии. Вероятно, основной термоподводящий канал Нижне-Кошелевского месторождения приурочен к тектоническому нарушению, которое трассируется ручьем Гремучий.

Авторы благодарны всем участникам структурно-геофизического отряда ИВиС ДВО РАН, а также сотрудникам компании ООО «Северо-Запад» за оказанное содействие в проведении исследований и получении результатов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН № FWME-2025-0001, номер государственного регистрационного учета 125031703820-4.

Список литературы

1. Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука. 1965. 208 с.

2. *Вакин Е.А.* Гидротермы Кошелевского вулканического массива / *Е.А. Вакин, З.Б. Декусар, А.И. Сережников, М.В. Спиченкова* // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. 1976. С. 57–78.

3. *Поздеев А.И.* Геология, гидродинамика и нефтегазоносность Кошелевского месторождения парогидротерм, Камчатка / *А.И. Поздеев, И.Н. Нажалова* // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 32–45.

4. *Писарева М.В.* Зона природного пара Нижнекошелевского геотермального месторождения // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 52–63.

5. *Рычагов С.Н.* Геолого-геофизическая модель крупнейшего на Камчатке Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения / *С.Н. Рычагов, И.Ф. Абкадыров, Ю.Ю. Букатов и др.* // Доклады АН. 2018. Т. 482. № 2. С. 183–187.

УДК 550.831:550.36

Сеточные (грид) двумерные модели избыточных плотностей на площади Нижне-Кошелевской термонаномалии (Кошелевский вулканический массив, Южная Камчатка)

Ю.Ю. Букатов, С.О. Феофилактов

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

На площади Нижне-Кошелевской термоаномалии проведены гравиметрические исследования. Построены и описаны вероятные сеточные (грид) двумерные модели структуры поля до глубины 800 м. В структуре термального поля выделяются участки с различными плотностными характеристиками, структура поля неоднородна.

Two-Dimensional Models of Excess Densities on the Area of the Nizhne-Koshelevskaya Thermal Anomaly (Koshelevsky Volcanic Massif, Southern Kamchatka)

Yuriy Yu. Bukatov, Sergey O. Feofilaktov

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

Gravity fields studies have been conducted in the area of the Nizhne-Koshelevskaya thermal anomaly. Probable two-dimensional (2D) grid models of the source structure of the thermal anomaly down to a depth of 800 m are constructed and described. The structure creating the thermal field is characterized by the presence of areas with different density characteristics, and the structure of the field is heterogeneous.

Введение

Активное освоение геотермальных ресурсов является одним из ключевых направлений современной энергетики. В этом контексте наиболее перспективным является Камчатский регион, который обладает значительным потенциалом в области геотермальной энергетики благодаря многочисленным гидротермальным системам. Южные районы Камчатского полуострова характеризуются высокой гидротермальной активностью, и среди них выделяется Паужетская гидротермальная система, представляющая собой один из наиболее изученных объектов данного региона.

В непосредственной близости от Паужетских источников расположен Кошелевский вулканический массив, являющийся крупной тектоно-магматической структурой субширотного простирания. Массив включает пять разновозрастных вулканов: Древний, Западный, Валентин, Центральный и Восточный [1, 2]. В период 1960–1970-х годов в рамках развития геотермальной энергетики на Камчатке были проведены комплексные геолого-гидрогеохимические исследования и поисково-разведочные работы, направленные на изучение термоаномалий Кошелевского массива (Нижне- и Верхне-Кошелевской).

Исследования, проведенные Е.А. Вакиным и его коллегами, позволили оценить тепловую активность Нижне-Кошелевской и Верхне-Кошелевской термоаномалий. Согласно полученным данным, Нижне-Кошелевская аномалия характеризуется тепловым потоком около 25000 ккал/с, а Верхне-Кошелевская – около 50000 ккал/с. Эти результаты послужили основой для проведения производственных геофизических и поисково-разведочных работ в районе Нижне-Кошелевской аномалии. В результате комплексных исследований и бурения скважин была выделена зона сухого пара, простирающаяся на глубину более 1500 метров от дневной поверхности. На основании этих данных было установлено наличие Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения с электрической мощностью не менее 90 МВт.

На современном этапе исследований существенно уточнены строение зоны пара и особенности близповерхностной разгрузки термальных вод. С помощью низкочастотного сейсмического зондирования в центральной части месторождения была выявлена изометричная область интенсивно аргиллизированных пород, насыщенная парогазовой смесью. Эта область имеет форму неправильной чаши и распространяется на глубину 250–300 метров. Область связана с источником тепла субвертикальными каналами повышенной трещинно-поровой проницаемости, которые погружаются на глубину более 5 км. Предполагается, что многофазная интрузия диоритов-диоритовых порфиритов, вскрытая бурением, служит источником тектонических деформаций. По зонам брекчирования в апикальных частях интрузии происходит подъем восходящего газоводного флюида к дневной поверхности [3–6].

Разгрузка пара и термальных вод на дневной поверхности образует Нижне-Кошелевскую термоаномалию, локализованную в овально-кольцевой геоморфологической структуре, вытянутой на 500 м вдоль глубоко врезанного оврага руч. Гремучий. Термоаномалия состоит из трех участков (полей) – Центрального, Верхнего и Нового. Наиболее характерными формами термопроявлений Центрального поля являются большие кипящие водоемы и теплые озера, мелкие кипящие водные и грязеводные котлы, пульсирующие источники, парогазовые струи, парящие грунты [7].

Центральный участок характеризуется высокими температурами парогазовых струй (до 120 ℃) и наличием кипящих водоемов, теплых озер, мелких кипящих водных и грязеводных котлов, пульсирующих источников и парогазовых струй. Температуры грунтов на этом участке не превышают 105 ℃ на глубине 0.8–3.0 метров. Верхний участок отличается более низкими параметрами парогазовых струй и водных источников. Новый участок, образовавшийся в 2008 году и к настоящему времени полностью остывший, представляет собой Нижне-Кошелевское Новое термальное поле, сформированное в результате внезапного прогрева горных пород парогазовым флюидом. По геоэлектрическим данным установлено, что поступление флюида происходило по трещинной зоне, связанной с Центральным участком термоаномалии.

Многолетние наблюдения авторского коллектива показали, что Нижне-Кошелевская термоаномалия является высокодинамичной геотермальной системой. Центральная часть аномалии расширяется за счет интенсивной геотермальной эрозии, периодически происходит повышение температуры парогазовых струй, сопровождающееся осаждением самородной серы.

Аппаратура и методика исследований

В 2009–2010 году проведены наземные гравиметрические исследования на площади Нижне-Кошелевского термального поля. Гравиметрия выполнялась автоматическим микропроцессорным гравиметром «CG-5 Autograv» (Scintrex, Канада). Диапазон измерений прибора >7000 мГал, разрешающая способность при снятии показаний 0.001 мГал. Геодезическое обеспечение осуществлялось GPS станциями GPS-станций Trimble (стационарной) и Topcon (переносной). Время записи на точках ≥15 мин. Точность определения координат пунктов исследования в плане составляла 0.04 м, по высоте 0.05 м. Наблюдения, выполненные в центральной части Нижне-Кошелевского месторождения на 1 км^2 по 10 параллельным профилям и одному поперечному (контрольному).

Полученные результаты

Гравиметрические работы позволили выделить сопряженные гравитационные аномалии, свидетельствующие о наличии плотностных неоднородностей в верхней части разреза. Карта аномального гравитационного поля была рассчитана для плотности пород промежуточного слоя 2.1 г/см³, соответствующей средней объемной плотности аргиллизированных пропилитов района. Модель представлена семью блоками, плотность пород в которых изменяется от 1.9 до 2.3 г/см³. В районе Нижне-Кошелевской термоаномалии выделяются три блока пород с плотностью 2.0, 2.1 и 2.2 г/см³ и мощностью

от 200 до 400 метров. Гравитационные аномалии имеют субширотное простирание, соответствующее направлению основной зоны разрывных тектонических нарушений вдоль ручья Гремучий.

Так же учитывая полученные геофизические данные и априорную геологическую информацию, построены сеточные (грид) двумерные плотностные модели предположительной структуры Нижне-Кошелевской термоаномалии по всем профилям на глубину до 800 м. Решения двумерной задачи гравиразведки для сеточных (грид) моделей проводилось в программе GravMagInv («ЛОЛГЕО», Россия). В результате моделирования в структуре термального поля выделяются участки с различными плотностными характеристиками, структура поля неоднородна. Данное моделирование позволяет оценить возможную структуру термального поля.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН № FWME-2025-0001, номер государственного регистрационного учета 125031703820-4.

Список литературы

1. *Вакин Е.А.* Гидротермы Кошелевского вулканического массива / *Е.А. Вакин, З.Б. Декусар, А.И. Сережников, М.В. Спиченкова* // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР.1976(а). С. 58–84.

2. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / Ред. *Ю.П. Масуренков* / М.: Наука. 1980. 172 с.

3. *Абкадыров И.Ф.* Опыт применения метода микросейсмического зондирования на геотермальных полях на примере Нижне-Кошелевской термоаномалии (Южная камчатка) / *И.Ф. Абкадыров, А.В. Горбатиков, М.Ю. Степанова, Ю.Ю. Букатов* // Материалы IX региональной молодежной конференции «Природная среда Камчатки». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2010. С. 49–60.

4. *Абкадыров И.Ф.* Новые данные о глубинном строении Нижне-Кошелевской термоаномалии (Южная Камчатка) / *И.Ф. Абкадыров, И.А. Нуждаев, Д.К. Денисов, А.В. Гобатиков, М.Ю. Степанова, С.О. Феофилактов* // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018. С. 87-90.

5. *Рычагов С.Н.* Геолого-геофизическая модель крупнейшего на Камчатке Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения / *С.Н. Рычагов, И.Ф. Абкадыров, Ю.Ю. Букатов, И.А. Нуждаев, С.О. Феофилактов* // Доклады АН. Т. 482. № 2. 2018. С. 183-187. DOI: 10.31857/s086956520003188-9

6. *Феофилактов С.О.* Слоисто-блоковая структура Паужетского геотермального месторождения (Камчатка) / *С.О. Феофилактов, С.Н. Рычагов, И.А. Нуждаев и др.* // М.: ГЕОС. 2025. 170 с. DOI: 10.34756/GEOS.2023.17.39148

7. *Калачева Е.Г.* Геохимия парогидротерм Кошелевского вулканического массива (Южная Камчатка) / *Е.Г. Калачева, С.Н. Рычагов, Г.П. Королева, А.А. Нуждаев* // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 41–56.

УДК 620.92

Опыт применения геотермометров на активах ООО «ЗН Геотерм»

М.А. Степанов[1], Т.С. Баранов[1], Э.К. Хмарин[1,2]

[1]*АО «Зарубежнефть», Москва, Россия*
MStepanov@nestro.ru
[2]*ООО «ЗН Геотерм», Москва, Россия*

В настоящее время при оценке новых геотермальных проектов большинство компаний используют геотермометры. В данной работе представлены способы и результаты применения геотермометров на ряде лицензионных участков ООО «ЗН Геотерм» на Камчатке: Корякско-Кеткинском, Верхне-Жировском и Больше-Банном.

Experience in Using Geothermometers at ZN Geotherm LLC Licensed Areas

Mikhail A. Stepanov[1], Timofey S. Baranov[1], Eduard K. Khmarin[1,2]

[1]*Zarubezhneft JSC, Moscow, Russia*
[2]*ZN Geotherm LLC, Moscow, Russia*

Currently, most companies use geothermometers when evaluating new geothermal projects. This research presents methods and results regarding the application of geothermometers at some ZN Geotherm LLC licensed areas: Koryaksko-Ketkinskiy, Verhnezhirovskoy, Bolshe-Banniy.

Введение

В настоящее время в мировой геотермальной энергетике при изучении геотермальных систем широко применяются геотермометры. Геотермометр – это эмпирическое или расчетное выражение на основе зависимого от температуры химического или изотопного равновесия между водой и минералами в условиях недр. Практические задачи, которым может помочь геотермометрия:

1. Прогноз температуры воды в зоне ее максимального нагрева.
2. Оценка степени разбавления холодными водами.
3. Сравнительная оценка дальности от зоны нагрева, уточнение пути движения воды.

В данной работе рассмотрены результаты применения геотермометров на трех лицензионных участках ООО «ЗН-Геотерм» на Камчатке.

Виды и особенности геотермометров

Выделяется 4 группы геотермометров: кремниевые, катионные, газовые и изотопные. С учетом объема исходных данных в представленной работе использовались кремниевые и катионные геотермометры.

Кремниевые геотермометры основаны на изменении растворимости различных видов кремнезема в воде в зависимости от температуры. Различные виды кремниевых геотермометров наиболее применимы (с допущениями) для определенных диапазонов температур воды в зоне нагрева [1]: 150–250 °С − кварцевый, 120–180 °С – халцедоновый, менее 120 °С – аморфно-кремниевый (пониженная корреляция).

Особенности применения кремниевых геотермометров [2]:

- малоприменимы при температуре воды в зоне нагрева более 250 °С;
- при смешении с холодными водами оценка температуры занижается;
- при активном паровыделении оценка температуры завышается;
- при выпадении кремнезема до и после отбора оценка температуры занижается;
- при высоком pH оценка температуры завышается (при 150–220 °С от pH > 7,5).

В данной работе применялись кварцевые при кондуктивном охлаждении [3, 4], кварцевый при адиабатическом охлаждении [4] и халцедоновый [5] геотермометры.

Катионные геотермометры основаны на реакциях ионного обмена между минералами и жидкой фазой в зависимости от температуры. Особенности применения Na-K геотермометров [2]:

- слабо восприимчивы к смешиванию, дегазации;
- лучше подходят для высоких температур (более 150–180 °C);
- при высоком содержании Ca2+ завышают температуру.

Na-K-Ca геотермометр применяется при высоком содержании Ca^{2+}, CO_2. При высоком содержании Mg^{2+} применяется корректировка на Mg (Na-K-Ca-Mg геотермометр).

В данной работе использовались Na-K [6, 4], Na-K-Ca [7], Na-K-Ca-Mg [8] геотермометры.

Корякско-Кеткинская группа

В данном блоке оценивались Корякско-Кеткинский лицензионный участок, Кеткинское месторождение и три группы источников на северном склоне влк. Корякская Сопка (Корякские нарзаны, Изотовские, Водопадные). Изучение геотермометров проводилось для оценки максимально возможной температуры в зоне скважины 1П Корякско-Кеткинской и определения направления движения нагретых вод к скважине 1П.

С учетом состава вод из катионных геотермометров для скважин 1П и К-1 применены Na-K геотермометры, для северной группы источников – Na-K-Ca-Mg геотермометр. Результаты:

- Вода в скважинах 1П Корякско-Кеткинская и К-1 Кеткинское близка по температуре друг к другу по всем кремниевым и Na-K геотермометрам (рис. 1). Также, сгруппированы температуры северных источников по Na-K-Ca-Mg геотермометру.
- По разнице катионных и кремниевых геотермометров на Корякско-Кеткинском и Кеткинском участках степень разбавления холодными водами вероятно значительно ниже, чем на северной группе источников.
- По 1П и К-1 кремниево-энтальпийная модель показывает температуру 145 °C, что близко к значениям низкотемпературного Na-K геотермометра Truesdell (рис. 2)
- По модернизированной диаграмме Гиггенбаха [9] вода Кеткинского месторождения находится в зоне равновесия по соотношению K-Mg, вода скважины 1П К-К в зоне частичного равновесия, что возможно связано с тем, что вода к скважине 1П прошла более длинный путь, чем к Кеткинскому месторождению.
- Прогнозируемая температура в зоне прогрева вод: Корякско-Кеткинская группа – 120–160 °C, северная группа источников – 260–320 °C.
- В отличие от северных источников вода скважины 1П и Кеткинского месторождения вероятно не нагревалась в зоне очага Корякского вулкана.

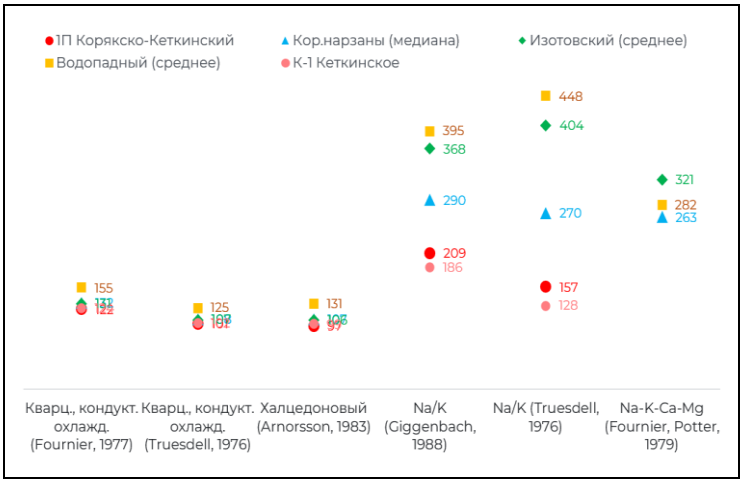


Рисунок 1 – Температура по геотермометрам, °C

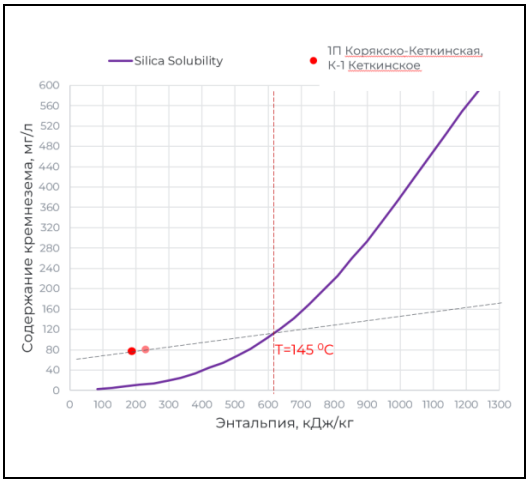


Рисунок 2 – Кремниево-энтальпийная модель смешивания

Верхнежировской участок

На Верхнежировском лицензионном участке в краткосрочной перспективе планируется строительство разведочной скважины. Расчет потенциальных температур по геотермометрам является одним из факторов для выбора участка для бурения скважины и определения предварительной схемы использования геотермального ресурса. Для воды скважины R-27, Вилючинских, Нижне-Жировых и Войновских источников применялись Na-K и кремниевые геотермометры, для Верхне-Жировых источников – Na-K-Ca геотермометр из-за высокой доли Ca. Результаты:

- По Вилючинским источникам и скважине R-27 результаты катионных геотермометров схожи, различия только по кремниевым возможно из-за большего разбавления холодными водами в источниках. Средняя температура по Na-K геотермометрам оценена в пределах 185–192 ℃ (рис. 3).
- По Вилючинским источникам температура по кремниево-энтальпийной модели смешивания (170 ℃) схожа со средней температурой по Na-K геотермометрам (рис. 4).
- По Нижне-Жировым источникам разница температур между кремниевыми и Na-K геотермометрами минимальна, что вероятно показывает на невысокую степень разбавления холодными водами. Температуры по Na-K геотермометрам ниже, чем в остальных источниках.
- Прогнозируемая температура в зоне прогрева вод: Вилючинские источники и скважина R-27 – 160–220 ℃, Нижне-Жировые источники – 140–190 ℃, Верхне-Жировые – 270 ℃, Войновские – 200–240 ℃.
- Несмотря на более высокую температуру на поверхности Нижне-Жировых источников относительно Вилючинских перспективность по геотермометрам выше в районе Вилючинских источников при условии вскрытия скважинами зон отсутствия смешения с холодными водами.

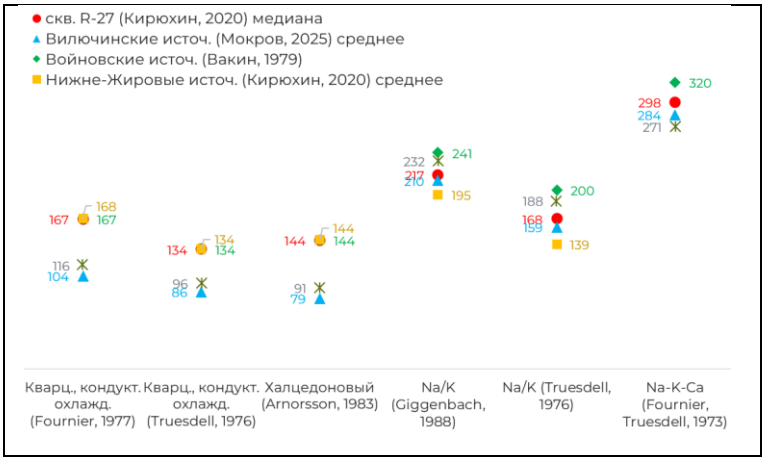


Рисунок 3 – Температура по геотермометрам, ℃

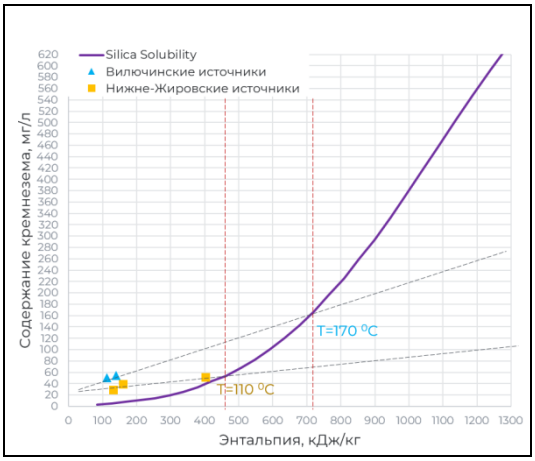


Рисунок 4 – Кремниево-энтальпийная модель смешивания

Больше-Банное месторождение

На Больше-Банном месторождении в среднесрочной перспективе планируется бурение оценочной скважины. Предыдущие скважины бурились до глубин максимум 1015 м, преимущественно 500–800м. Оценка температур по геотермометрам позволит оценить необходимость бурения более глубоких скважин. Для расчета температур использовались кремниевые и Na-K геотермометры. Результаты:

- Температура по кремниевым и Na-K геотермометрам находится в одном диапазоне, что говорит о высокой вероятности отсутствия разбавления холодными водами (рис. 5).
- По кремниево-энтальпийной модели смешивания температура воды до смешивания составляет 220 ℃ (рис. 6).
- Прогнозируемая температура в зоне прогрева вод составляет 180–220 ℃.

Бурение глубоких скважин не приведет к существенному росту температуры. Возможен рост со 170 °С до 180–220 °С, но неизвестно на какой глубине.

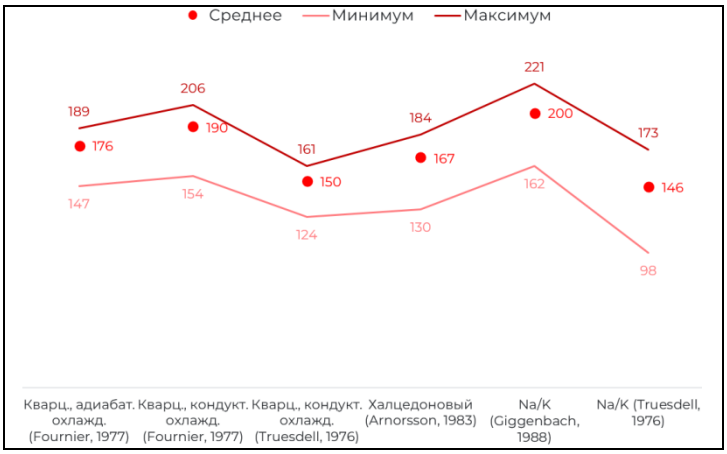


Рисунок 5 – Температура по геотермометрам, °С

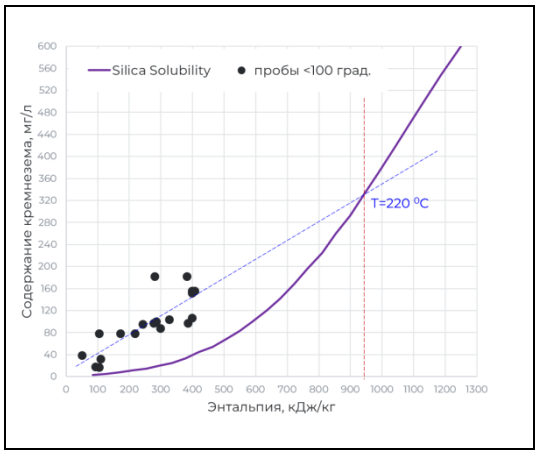


Рисунок 6 – Кремниево-энтальпийная модель смешивания

Заключение

Применяя кремниевые и катионные геотермометры, кремниево-энтальпийную модель смешивания проведена оценка прогнозных температур воды в зонах их нагрева на Корякско-Кеткинском, Верхнежировском и Больше-Банном участках Камчатки.

Комплексирование методов позволяет не только увеличить уверенность в оценке температуры, но и получить дополнительную информацию о степени разбавления холодными водами, дальности источника нагрева, зональности вод.

Необходимо всегда иметь ввиду, что перечисленные методы исследований являются косвенными и зависят от многих факторов и процессов, происходящих в недрах, большинство из которых могут быть не выявлены исследователями.

Список литературы

1. *Fricovsky B.* Geothermometry techniques in reservoir temperature estimation and conceptual site models constraction: Principles, methods and application for the Besenova elevation hydrogeothermal structure, Slovakia / *B. Fricovsky, L. Tometz, M. Fendek* // Mineralia Slovaca. 48. 2016. pp. 1–60.

2. *Gulec N.* Applications of geothermometry // Reviewed Course Book of International Summer School on Geothermal Geochemistry Izmir. 2005. pp. 85–103.

3. *Truesdell A.H.* Geochemical techniques in exploration (Summary of Section III) / Development and Use of Geothermal Resources: Proceedings of the Second United Nation Symposium, San Francisko. 1976. V. 1. pp. 53–79.

4. *Fournier R.O.* Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems // Geothermics. 1977. V. 5, pp. 41–50.

5. *Arnorsson S.* Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems – implications for chemical geothermometry investigations // Geothermics. 1983. V. 12. № 2–3. pp. 119–128.

6. *Giggenbach W.F.* Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Ca-Mg geoindicators // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1988. V. 52. № 12. pp. 2749–2765.

7. *Fournier R.O.* An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters / *R.O. Fournier, A.H. Truesdell* // Geochimica et Cosmochimica Act. 1973. V. 37. № 5. pp. 1255–1275.

8. *Fournier R.O.* Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer / *R.O. Fournier, R.W. Potter* // Geochimica et Cosmochimica Act.1979. V. 43. № 9. pp. 1543–1150.

9. *Таран Ю.А.* Минеральные воды Авачинской депрессии, Камчатка / *Ю.А. Таран, Г.В. Рябинин, Б.Г. Покровский, И.Н. Нажалова, Н.А. Малик* // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. № 2. Вып. 50. С. 22–39

10. *Вакин Е.А.* Мутновский геотермальный район на Камчатке / *Е.А. Вакин, Г.Ф. Пилипенко* // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях / Отв. ред. *Аладьев И.Т., Сугробов В.М* // Москва: Наука. С. 36–45.

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

12. *Мокров Е.А.* Отчет по проведению комплексных геолого-геофизических работ на Верхнежировском участке / *Е.А. Мокров.* Москва, АО «ВНИИнефть». 2025. 473 с.

РАЗДЕЛ II. ГИДРОГЕОЛОГИЯ (ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ И ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, ГЕЙЗЕРЫ)

CHAPTER II. HYDROGEOLOGY (HYDROTHERMAL SYSTEMS, GEOTHERMAL AND HYDROMINERAL RESOURCES, GEYSERS)

УДК 556.3

Применение геотермотомографии для выявления продуктивных геотермальных резервуаров и зон конвективной циркуляции теплоносителя в Северо-Мутновской гидротермальной системе (Камчатка, Россия)

А.В. Кирюхин[1,2], А.Ю. Поляков[1], О.О. Усачева[1], М.И. Афонин[2]

[1]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*
avkiryukhin2@mail.ru
[2]*Камчатский Государственный Университет им. В. Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Метод 3D картирования геотемпературных полей основан на сплайн-аппроксимации формулы Грина точечных измерений температуры в геотермальных скважинах и разгрузок термальных источников. В качестве исходных используются данные по 77 скважинам и семи группам термальных источников на площади 13×27 км^2 и в диапазоне глубин от поверхности Земли до −1290 м абс. Анализ расчетного 3D распределения температуры представлен в горизонтальных сечениях на отметках −250, −750 и −1250 м абс. и в вертикальных сечениях меридионального и широтного направления. Для выявления продуктивных геотермальных резервуаров и областей конвективной циркуляции теплоносителя применялись критерии минимального градиента температуры (<0.15 °C/м) при ее повышенных абсолютных значениях (>240 °C).

The Use of Geothermotomography to Identify Productive Geothermal Reservoirs and Zones of Convective Heat Transfer Circulation in the North-Mutnovsky Hydrothermal System (Kamchatka, Russia)

Alexey V. Kiryukhin[1,2], Andrey Yu. Polyakov[1], Olga O. Usacheva[1], Mikhail I. Afonin[2]

[1]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*
[2]*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

The 3D mapping method of geothermal fields is based on spline approximation of Green's formula for point measurements of temperature in geothermal wells and thermal source discharges. The initial data used are from 77 wells and seven groups of thermal sources within an area of 13 x 27 km^2 and in the depth range from the Earth's surface to −1290 masl. The analysis of the calculated 3D temperature distribution is presented in horizontal cross-sections at elevations of −250, −750 and −1250 m above sea level, and in vertical cross-sections in the meridional and latitudinal directions. To identify productive geothermal reservoirs and areas of convective circulation of the heat carrier, criteria based on the minimum temperature gradient (<0.15 °C/m) were applied at elevated absolute temperature values (>240 °C).

Введение

Исследования и использование геофлюидных систем с активной циркуляцией геофлюидных фаз, в частности высокотемпературных геотермальных месторождений в вулканических областях, осложняется их сложным геологическим строением. Классическое геологическое картирование вулканогенно-осадочных стратиграфических подразделений

трудноосуществимо из-за их сильной изменчивости в латеральной плоскости, отсутствия надежных маркирующих горизонтов, или вообще по причине их локального распространения. Картирование разломов затрудняется быстрой динамикой их преобразования из активного в пассивное состояние, связанное с запечатыванием вторичными минеральными фазами или изменением геомеханического состояния.

В этой связи наиболее эффективным доказательным инструментом для 3D картирования геотермальных циркуляционных систем представляется 3D картирование геотемпературного поля. Области с конвективной циркуляцией теплоносителя характеризуются высокой температурой и низкими градиентами температуры геотемпературного поля, указанные параметры могут рассматриваться в качестве индикаторов целевых резервуаров для получения геотермальной продукции (высокодебитных добычных скважин) и утилизации отработанного теплоносителя.

Подробно методика расчета трехмерного геотемпературного поля описана в работах [1–3]). Алгоритмическая реализация 3D картирования геотермальных полей выполнена с помощью комплекта GREEN из библиотеки LIDA – 3 по аппроксимации функций и цифровой фильтрации, разработанной в ВЦ СО АН СССР и пакета графической визуализации Surfer.

Исходные данные и результаты геотермотомографии

В качестве исходных данных использованы результаты измерений забойных температур (с использованием автономных термометров ТСУ-I-250, ТСУ-I-220, МСТ-400, а также термометры «Кастер», [4])) во время остановок и выстойки поисково-разведочных скважин в процессе их бурения в Мутновском геотермальном районе (77 скважин), температуры термальных разгрузок (4, 5, 7, 8, 13, 16–17 и 18, рис. 1), также учитывались оценки по геохимическим термометрам и максимальные давления в скважинах с преобладанием пара (пересчитывались на температуру по условиям насыщения), на уровне топоповерхности за пределами термоаномалий задавалась температура 10 ℃. Общее число точек измерений, использованных при расчете 3D температурного поля составило 450, заданное среднеквадратичное отклонение сплайн-аппроксимации 1 ℃.

Расчеты 3D геотемпературного поля проводились на двух регулярных вычислительных сетках: (1) $X \in [40250, 52750]$, $Y \in [11250, 37750]$, $Z \in [-1250, -250]$ с шагом 500 м по всем направлением, общее число узлов сетки составило 4212; (2) $X \in [40000, 53000]$, $Y \in [11000, 38000]$, $Z \in [-1500, 0]$ с шагом 50 м по всем направлением, общее число узлов сетки составило 3246351. На рис. 2, 3 и 4 показаны результаты геотермотомографии 3D геотемпературного поля в горизонтальных сечениях (−250, −750, −1250) м абс. и на вертикальных разрезах.

На срезе −250 м абс. (рис. 2) с севера на юг отчетливо видны четыре термоаномалии с максимальной температурой 230–250 ℃, три из которых эпицентрально совпадают с B-Жировскими (14–15), Дачными (7–8) и C-Мутновскими (4–5) термальными полями, а четвертая не имеет явной разгрузки на поверхности Земли. На срезе −750 м абс. (рис. 2) указанные выше четыре аномалии сохраняются, увеличивая максимальную температуру до 290 ℃. По южной термоаномалии прослеживается тренд увеличения температуры в направлении к Мутновскому вулкану. На срезе −1250 м (рис. 2) сохраняются термоаномалии под Верхне-Жировским участком и восточным флангом Дачного участка, также сохраняется тренд увеличения температуры в сторону Мутновского вулкана и даже экстраполируется сверхкритический геотермальный резервуар с температурой 370–430 ℃.

В меридиональных разрезах (рис. 3) на западных флангах (разрезы AA и BB) и на восточных (разрезы EE и FF) Мутновского геотермального месторождения не видно явных признаков гидротермальной циркуляции в виде аномального продвижения фронта геоизотерм, а вот на разрезах CC и DD (это полоса шириной около 2 км) хорошо просматриваются области конвективного теплопереноса в диапазоне температур от 320 до 240 ℃.

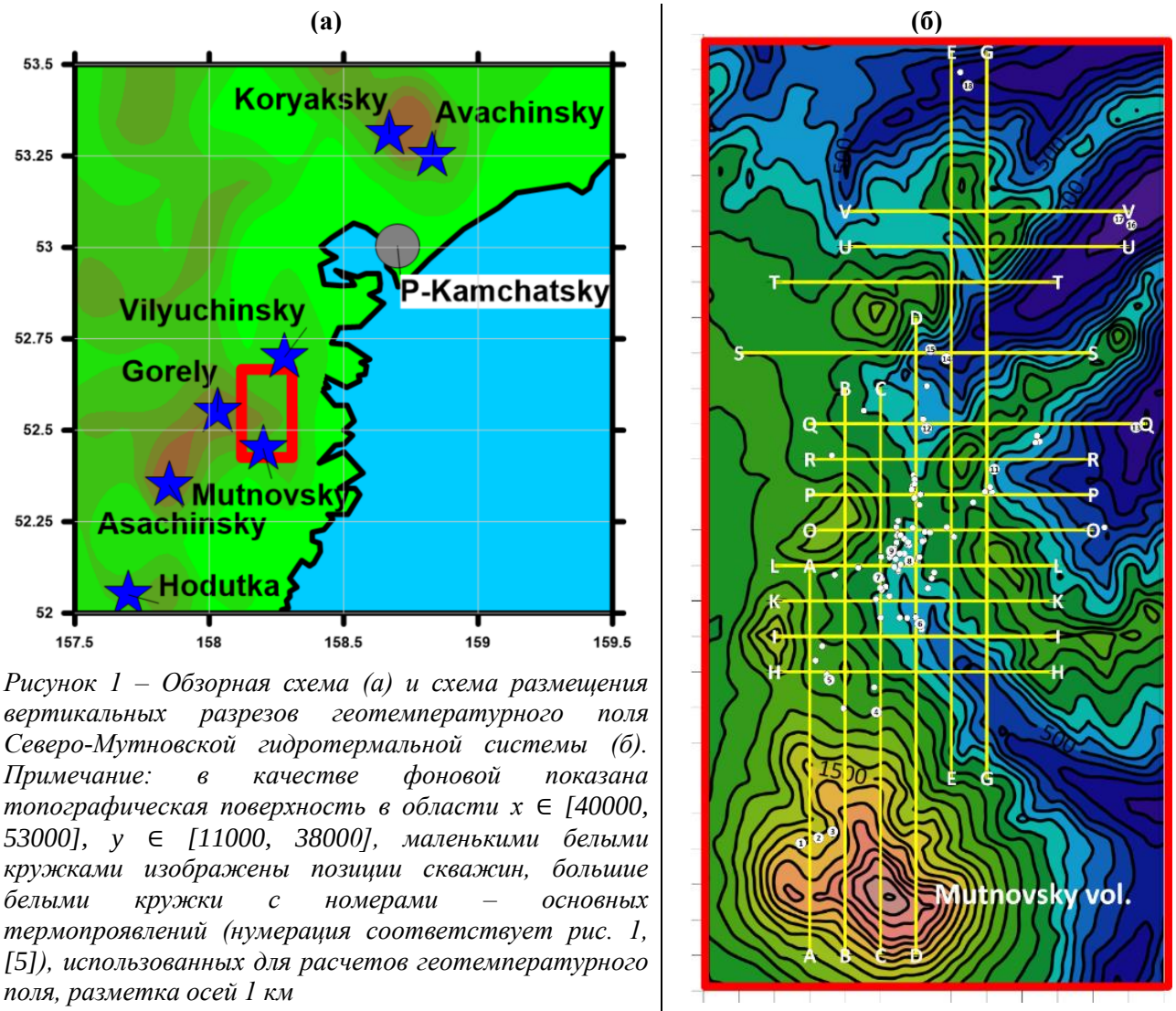


Рисунок 1 – Обзорная схема (а) и схема размещения вертикальных разрезов геотемпературного поля Северо-Мутновской гидротермальной системы (б). Примечание: в качестве фоновой показана топографическая поверхность в области x ∈ [40000, 53000], y ∈ [11000, 38000], маленькими белыми кружками изображены позиции скважин, большие белыми кружки с номерами – основных термопроявлений (нумерация соответствует рис. 1, [5]), использованных для расчетов геотемпературного поля, разметка осей 1 км

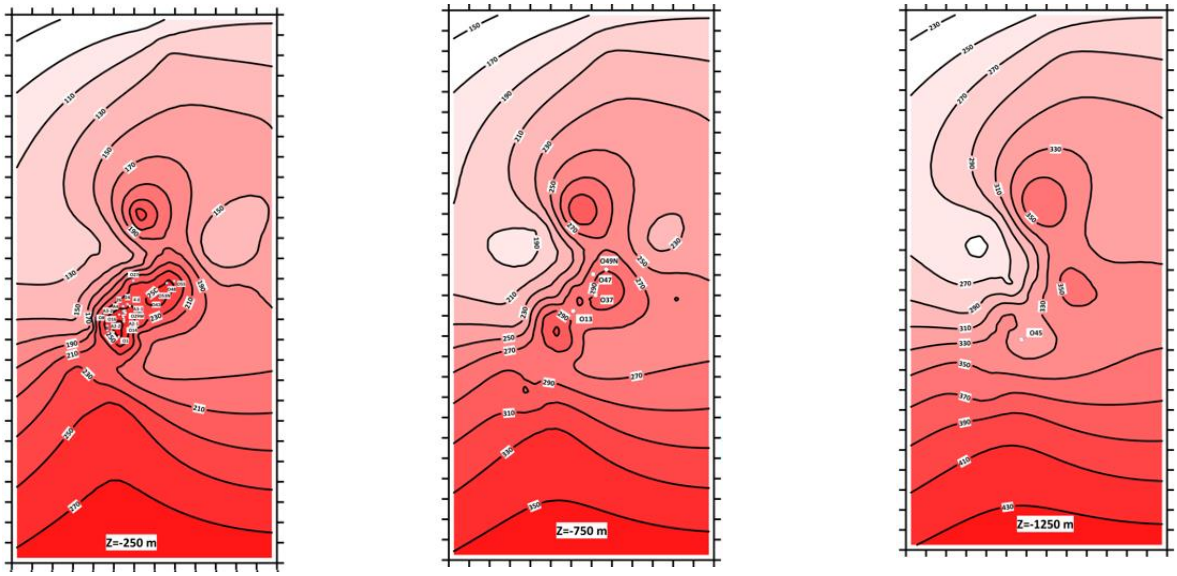


Рисунок 2 – расчетное распределение температуры в горизонтальных сечениях −250, −750 и −1250 м абс

Широтные разрезы расположены вкрест потоков теплоносителя и характеризуют распределение температуры в его сечениях (рис. 4). Наиболее явно области конвективной циркуляции фиксируются в разрезах LL, OO и PP в диапазоне температур от 320 до 260 °C,

на разрезе РР даже до 220 °С. При этом проявляется ассиметричной падение осевой плоскости геотемпературного поля на восток. На разрезах НН и II проявлены признаки наличия глубинной геотермоаномалии с температурой выше 320 °С. На рис. 3 и 4 показаны вертикальные разрезы с совмещенными распределениями температуры и градиентов температуры. Области с градиентами температуры менее 0.15 °С/м и температурой выше 240 °С на этих разрезах интерпретируются как зоны с конвективной циркуляцией теплоносителя и потенциальной продуктивностью, их можно рассматривать как целевые для постановки бурения разведочно-эксплуатационных скважин.

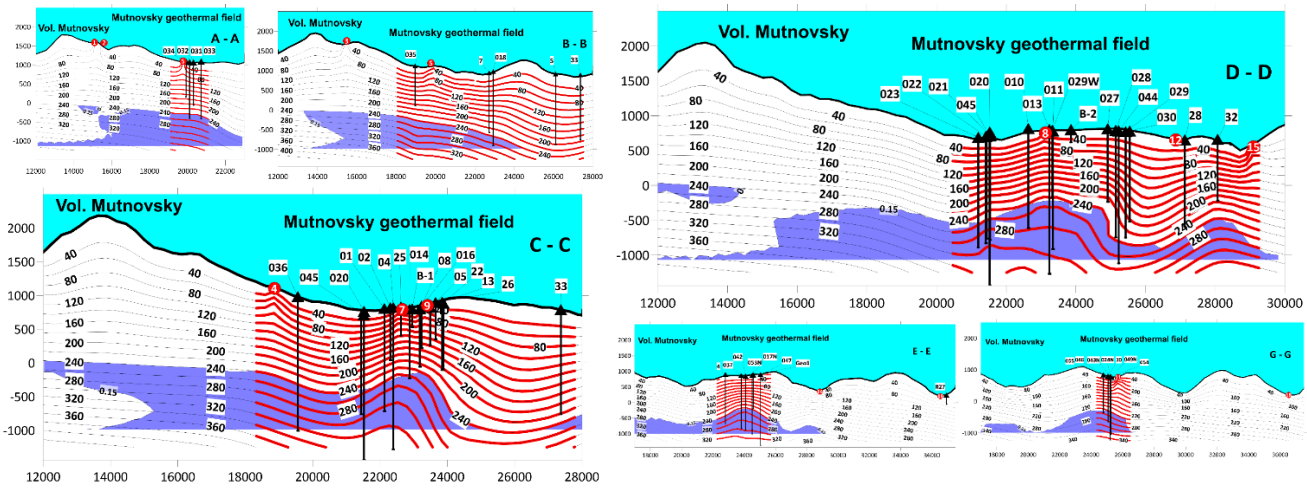


Рисунок 3 – Вертикальные субмеридиональные разрезы с совмещенными распределениями температуры и градиентов температуры. Позиции разрезов показаны на рис. 1. Области с градиентами температуры менее 0.15 °С/м и значениями температуры выше 240 °С закрашены синим цветом. Наиболее достоверная область показана красными жирными геоизотермами

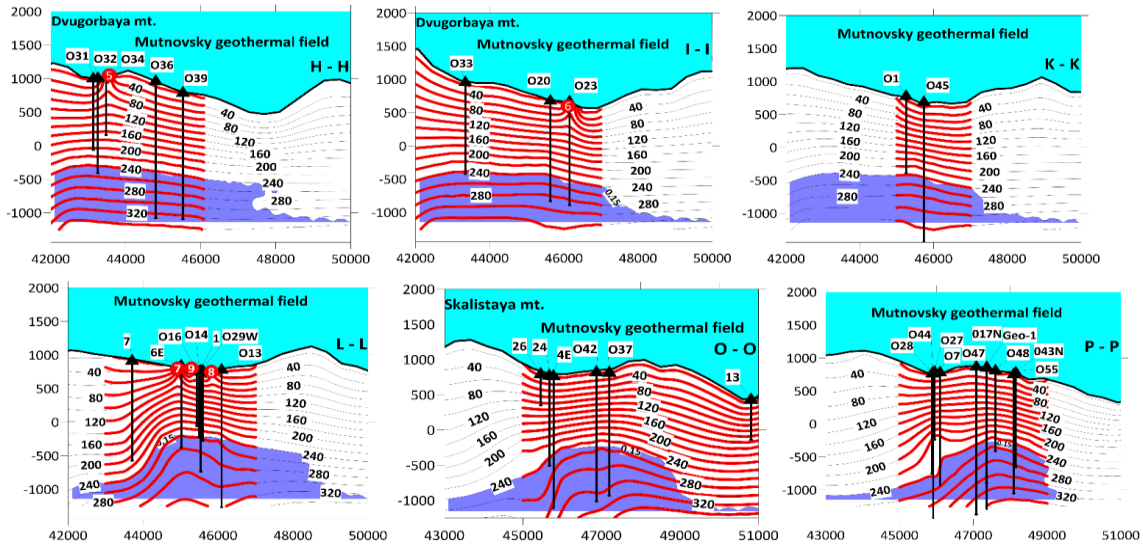


Рисунок 4 – Вертикальные субширотные разрезы с совмещенными распределениями температуры и градиентов температуры. Позиции разрезов показаны на рис. 1. Области с градиентами температуры менее 0.015 °С/м и значениями температуры выше 240 °С закрашены синим цветом. Наиболее достоверная область показана красными жирными геоизотермами…

Список литературы

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

2. *Масуренков Ю.П.* Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / Ред. *Ю.П. Масуренков*. М.: Наука, 1980. 172 с.

3. *Kiryukhin A.V.* Magma fracking and production reservoirs beneath and adjacent to Mutnovsky volcano based on seismic data and hydrothermal activity / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, P.O. Voronin et al.* // Geothermics. 2022. Vol. 105. P. 102474. DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102474.

4. *Polyakov A.Yu*. Three-Dimensional Thermohydrodynamic Model of the Mutnovsky Magma–Hydrothermal System / *A.Yu. Polyakov, A.V. Kiryukhin* // Journal of Volcanology and Seismology. 2026. Vol. 20. №. 1. pp. 204–210. DOI: 10.1134/S074204632670003X

5. *Finsterle S.* iTOUGH2 V7.0 Command Reference. Rep. LBNL-40041 rev. Lawrence Berkeley Natl. Lab. 2014.

6. *Pruess K.* TOUGH2 user's guide, Version 2.0. Rep. / K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab. 1999.

УДК 553.251.2 + 551.234

Отложения коллоидного кремнезема из скважин Мутновского геотермального месторождения

А.В. Сергеева[1], Н.Б. Журавлев[1], А.В. Кирюхин[1], Р.И. Лыга[2], Е.В. Карташева[1], М.А. Назарова[1], А.А. Кузьмина[1], О.Р. Хубаева[1], П.О. Воронин[1], Н.А. Мальцева[2], А.Д. Верескун[2]

[1]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*
anastavalers@gmail.com
[2]*Донецкий государственный университет, 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, ДНР, Россия*

В работе изучены отложения коллоидного кремнезема, мощностью до десятков сантиметров, и протяженностью до десятков метров вокруг скважин Мутновского месторождения, Камчатка, Россия. Содержание SiO_2 в образцах 80−90%. Методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (фундаментальные параметры) выявлены заметные концентрации Sr, Ba, As, Sb, Se, Te, Cr, Sn и др. Состав отложений связан с глубинными рудообразующими процессами, формированием минералов Au, Ag, Sb, Te, Se, As. Атмосферные осадки не вымывают микроэлементы, так как кремнезем обладает высокой сорбционной емкостью, и тяжелые металлы иммобилизуются в коллоидной силикатной матрице. Отложения формируются из-за поступления на поверхность раствора, пересыщенного относительно выделения аморфного кремнезема, опала. Высокие концентрации кремнезема в растворе обусловлено как щелочной средой, так и высокой температурой продуктивного резервуара.

Colloidal Silica Deposits From The Mutnovsky Geothermal Field Wells

Anastasia V. Sergeeva[1], Nikita B. Zhuravlev[1], Alexey V. Kiryukhin[1], Rita I. Lyga[2], Elena V. Kartasheva[1], Maria A. Nazarova[1], Anna A. Kuzmina[1], Olga R. Khubaeva[1], Pavel O. Voronin[1], Natalya A. Maltseva[2], Anastasia D. Vereskun[2]

[1]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*
[2]*Donetsk State University, 24 Universitetskaya Street, Donetsk, Russia*

The work studies colloidal silica deposits, up to tens of centimeters thick, and up to tens of meters long, around the wells of the Mutnovskoye field, Kamchatka, Russia. The SiO_2 content in the samples is 80−90%. Using X-ray fluorescence spectroscopy (fundamental parameters), significant concentrations of Sr, Ba, As, Sb, Se, Te, Cr, Sn, and other elements were identified. The composition of the deposits is related to deep-seated ore-forming processes, the formation of minerals Au, Ag, Sb, Te, Se, As. Precipitation does not wash out trace elements, as silica has a high sorption capacity, and heavy metals are immobilized in a colloidal silicate matrix. Deposits are formed due to the arrival at the surface of a solution that is supersaturated with respect to the allocation of amorphous silica, opal. High concentrations of silica in the solution are due to both the alkaline environment and the high temperature of the productive reservoir.

Введение

Геотермальное месторождение Мутновское, названное по имени вулкана, к которому оно приурочено, находится в 70 км южнее Петропавловска-Камчатского, оно активно используется добычными предприятиями и служит в качестве уникального туристического объекта. Месторождение эксплуатируется для генерации электроэнергии более двух десятков лет, а геологоразведочные работы проводились с середины XX века. От прежних этапов разведки и освоения геотермальных ресурсов, на территории Мутновского геотермального (рудного) района, остались несколько скважин, работающих на выпуск парогазовой смеси. За годы работы вокруг этих скважин сформировались толщи отложений коллоидного кремнезема, мощностью до первых десятков сантиметров, простирающиеся на десятки метров в пределах устья, рис. 1.

Исследованные фонтанирующие скважины расположены на северной периферии вулкана Мутновский. Устья скважин находятся на абсолютных отметках от 765 м для скважины 020, до 1120 м для скважины 035. Скважина 047 расположена в 1200 м к западу от Верхне-Мутновской ГеоЭС на абсолютной отметке 905 м. По результатам ежегодного пробоотбора газа, конденсата, и измерения устьевых температур фонтанирующих скважин установлено, что Na-K геотермометр по химическому составу воды указывает на температуры в диапазоне от 254 до 366 ℃ для скважин 035, и от 270 до 353 ℃ для скважин 020, 022. Скважины разгружают флюиды, обогащенные газом, с соотношением газ/вода от 0.1 до 600 л/кг. Высокие скорости истечения газов вызывают громкий шум, более 110 дБ, и распыл водно-флюидной составляющей потока в виде аэрозоля. Из-за резкого расширения температура струи на устье падает вследствие дроссельного эффекта, например на устье скважины 035 температура факела распыла порядка 80 ℃ [1].



Рисунок 1 – Примеры отложений коллоидного кремнезема; а – вид отложений аморфного кремнезема; б – отложения аморфного кремнезема возле скважины 047 на снежнике

Помимо тепловых ресурсов, в недрах Мутновской геотермальной (рудной) системы сосредоточены запасы ценных металлов, и под влиянием тепла подземных флюидов происходят рудообразующие процессы. Рудоносный потенциал глубинного флюида Мутновского месторождения исследован ранее, отмечаются повышенные концентрации рудных элементов, наличие рудных минералов [2].

Материалы и методы

Образцы отложений были отобраны возле скважин 020, 047, 022, в период 2022–2025 гг. Отдельно для сравнения приведены данные по скважине 035, в стволе которой сформировались отложения кремнезема, но площадь вокруг которой не покрыта осадками. Параллельно были отобраны конденсаты из скважин, для анализа микро- и макроэлементного состава. Элементный состав был выполнен с помощью рентгенофлуоресцентных спектрометров Pioneer-4 (Bruker) и MAX-GVM (Спектрон, Россия). Минеральный состав исследован с помощью рентгеновского дифрактометра Max XRD-7000

(Shimadzu) в диапазоне 6–60 °2θ, с шагом 0.1 °2θ, скорость сканирования составляла 2 град/мин, что эквивалентно выдержке в точке в течение 3 секунд, при вращении образца. Инфракрасные спектры были записаны с помощью инфракрасного спектрометра с преобразованием Фурье IRAffinity-1, в диапазоне волновых чисел 400–4000 $см^{-1}$, с разрешением 4 $см^{-1}$, число сканов составляло 100 [3].

Результаты

Все осадки рентгеноаморфны (рис. 2), в некоторых случаях в составе фиксируется хлорид натрия, глубинный компонент, поступающий вместе с флюидом. Инфракрасные спектры полностью отвечают опалу. Наиболее яркие полосы на инфракрасных спектрах отвечают колебаниям молекул воды и тетраэдрической группировки [SiO_4]. Полосы поглощения широкие, диффузные, что в целом соответствует аморфному состоянию материала отложений. Полоса около 1100 $см^{-1}$, отвечающая колебанию $\nu_3[SiO_4]$, самая интенсивная в инфракрасном спектре силикатов, сливается с полосой около 1000 $см^{-1}$, от полносимметричного колебания $\nu_1[SiO_4]$. Около 800 $см^{-1}$ находится широкая полоса средней интенсивности, у кварца в этой области расположен дублет с максимумами 780 и 800 $см^{-1}$, у опала происходит слияние полос из-за уширения пиков. Полоса деформационного колебания $\nu_2[SiO_4]$ расположена около 470 $см^{-1}$. В высокочастотной области находятся широкие полосы поглощения молекул воды, около 3445 и 3660 $см^{-1}$. По положению они ближе всего к полосам поглощения жидкой воды, так как выделение коллоида происходило при низких температурах, при которых степень гидратации высокая [3].

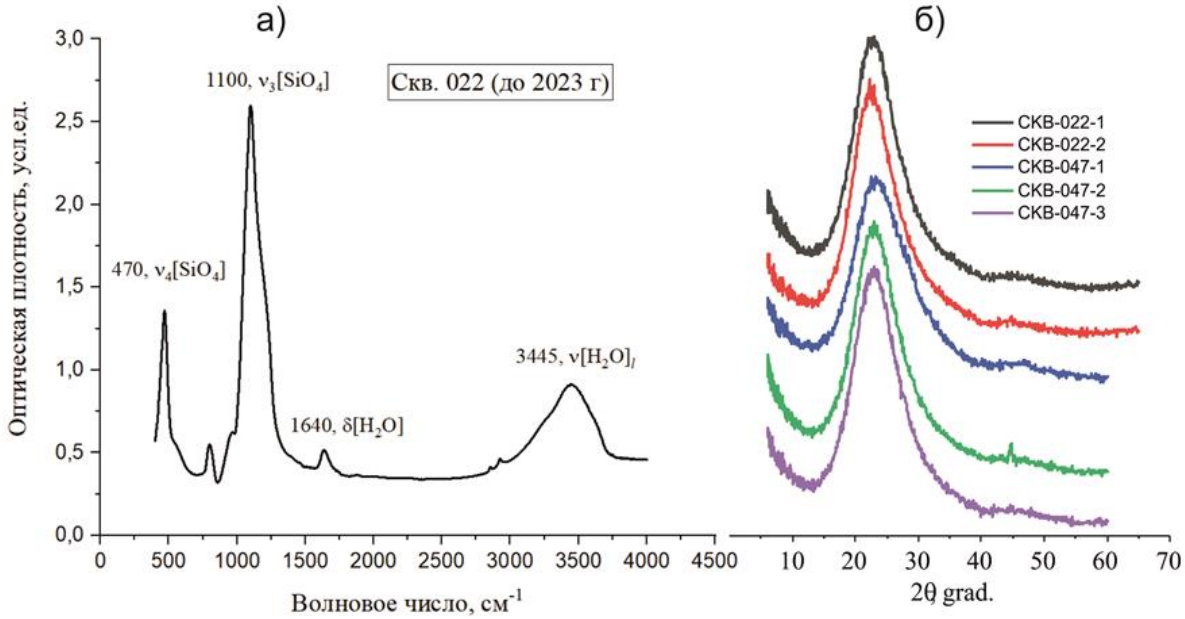


Рисунок 2 – Инфракрасный спектр (а) и дифрактограмма (б) силикатных отложений [3]

Содержание кремнезема находится в пределах 85–90% по массе, концентрации натрия, кальция, калия, магния, алюминия находятся на уровне десятых долей процента. Наиболее вероятно, что алюминий замещает кремний в коллоидном кремнеземе, при этом натрий, калий, кальций компенсируют возникающий отрицательный заряд каркаса. В этом случае сорбционная емкость кремнистых материалов увеличивается, так как подвижные катионы легко обмениваются с катионами окружающей среды. Оценка микроэлементного состава была выполнена с помощью полуколичественного бесстандартного метода фундаментальных параметров, реализованного на рентгенофлуоресцентном спектрометре MAX-GVM. Обнаружены заметные концентрации Sr, Ba, As, Sb, Se, Te, Sb, Cr, Sn,Cs и др.

Обсуждение результатов

В составе отложений коллоидного кремнезема отмечаются повышенные содержания серы, хлора, стронция и бария, эти элементы часто встречаются в составе глубинных нагретых вод. Из микроэлементов присутствуют мышьяк, сурьма, висмут, селен, теллур, золото, цинк, никель, олово, хром, никель, рубидий, цезий, церий, иттрий и др. Этот перечень практически полностью отвечает рудной минерализации, которая известна на месторождениях, приуроченных к Мутновскому вулкану. Наличие микроэлементов в составе отложений может быть объяснено как сорбцией металлов матрицей кремнезема, так и механическими примесями рудных минералов [2].

Образование кремнистых отложений, и их распространение по прискважинным площадям определяется выпадением осадков из остывающего аэрозоля теплоносителя в атмосфере, когда скважина работает на выпуск парогазовой смеси. Глубинный теплоноситель, поступая на дневную поверхность, распыляется под давлением в виде парогазового шлейфа, почти не претерпевая изменений, связанных с взаимодействием вода-порода, смешении с водами различного генезиса, которые неизбежны при естественных разгрузках, однако процессы вскипания и конденсации, по всей видимости, могут присутствовать. Поэтому он несет фактически не искаженную информацию о составе глубинного флюида Мутновского месторождения, его рудоносном потенциале, условиях на глубине, о переносе рудных элементов, которую можно интерпретировать с учетом возможных процессов кипения и конденсации.

Заключение

На Мутновском геотермальном рудном месторождении, расположенном на юге Камчатки, действуют несколько старых скважин, через которые в атмосферу распыляется глубинный флюид, обогащенный кремнеземом и целым спектром других элементов. Струя парогазовой смеси, расширяясь, быстро остывает до атмосферной температуры, водяной пар конденсируется, и образуется аэрозоль. Выпадая на прискважинном пространстве в течение десятков лет, распыляемый аэрозоль сформировал отложения аморфного коллоидного кремнезема, мощностью до первых десятков сантиметров, и протяженностью до первых десятков метров вокруг скважин. Содержание SiO_2 в отложениях находится в пределах 80–90 масс. %, содержание алюминия, натрия, калия, кальция, магния составляет десятые доли процентов, наблюдаются повышенные содержания серы, хлора, стронция, бария. В микроэлементном составе присутствуют Sn, Ba, Au, As, Sb, Zn, Te, Se, P, Ni, Bi, Cr, Ti, Mn, Y, Ce, V, Bi, Rb, I, Cs. Олово, золото, мышьяк, сурьма, теллур, селен, и ряд других элементов входят в состав рудных минералов Мутновского месторождения, чаще всего в виде сульфидов и сульфосолей. Для них благоприятна щелочная среда, так как сульфосоли неустойчивы в кислых средах вследствие протонирования атомов серы в сульфоанионе. Поэтому микроэлементный состав отложений коллоидного кремнезема отражает современные процессы рудообразования Мутновского геотермального рудного месторождения.

Работа выполнена в рамках темы НИР Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН «Тепломассоперенос, сейсмичность и минеральные преобразования в гидротермальных и вулканических системах, термогидродинамическое-геохимическое-геомеханическое моделирование, приложения для оценки геотермальных ресурсов, прогноза катастрофических гидротермальных процессов, извержений вулканов и сильнейших землетрясений», FWME-2024-0007, регистрационный номер 124032200001-3.

Использованы ресурсы центра коллективного пользование ИВиС ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа».

Список литературы

1. *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. 102474.

2. *Skilskaya E.D.* Geochemical Characteristics and the Ore Potential of the Mutnovsky Geothermal Field, Southern Kamchatka / *E.D. Skilskaya et al.* // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. Т. 19. №. 5. С. 435–450.

3. *Сергеева А.В.,* «Силикатный снег» Мутновского геотермального месторождения: состав, условия образования // В сборнике: Вулканизм и связанные с ним процессы / *А.В. Сергеева, А.В. Кирюхин, Н.Б. Журавлев, П.О. Воронин, О.Р. Хубаева, Р.И. Лыга, Е.В. Карташева, М.А. Назарова, А.А. Кузьмина, Н.А. Мальцева, А.Д. Верескун* // Материалы XXIX ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2025. С. 275–278.

УДК 662.997

Моделирование теплоизвлечения из одиночной геотермальной скважины (методы коаксиального теплообмена)

А.П. Корчагина[1,2], А.В. Кирюхин[2,1]

[1]*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия*
korchaginaap@kamgu.ru
[2]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Скважина R27, расположенная вблизи Вилючинских источников, в течение 40 лет использовалась в режиме самоизлива с расходом около 1 кг/с и температурой 75 ℃ для теплоснабжения спортивно-туристического комплекса, до снижения уровня в ней. Одним из вариантов решения проблемы теплоснабжения является использование методов коаксиального теплообмена на базе существующей скважины с подачей воды из холодного источника 6 ℃, расположенного выше по рельефу. Для моделирования условий эксплуатации применяется TOUGH2 термогидродинамическое моделирование в осесимметричной постановке и рассмотрены два метода коаксиального теплообмена: 1. Модель коаксиальной геотермальной системы; 2. Модель открытой коаксиальной системы с пакером. Установлена возможность длительной устойчивой эксплуатации с расходом циркуляции 0.2 кг/с и температурой на выходе 38.72 ℃ и 50.10 ℃ соответственно.

Modeling Heat Extraction from a Single Geothermal Well (Coaxial Heat Transfer Methods)

Anastasia P. Korchagina[1,2], Alexey V. Kiryukhin[2,1]

[1]*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*
[2]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

Well R27, located near the Vilyuchinsky springs, was used for 40 years in a self-flowing mode with a flow rate of approximately 1 kg/s and a temperature of 75 ℃ to supply heat to a sports and tourism complex, until the water level in the well decreased. One solution to the heat supply problem is the use of coaxial heat exchange methods based on an existing well with water supplied from a cold spring of 6 ℃, located upstream. TOUGH2 thermohydrodynamic modeling in an axisymmetric setting is used to simulate operating conditions, and two coaxial heat exchange methods are considered: 1. Coaxial geothermal system model; 2. Leaky borehole coaxial geothermal system with packer. The possibility of long-term stable operation with a circulation flow rate of 0.2 kg/s and an outlet temperature of 38.72 ℃ and 50.10 ℃, respectively, was established.

Данные реального объекта

Скважина R27 расположена на северо-северо-восточной части Северо-Мутновской вулкано-тектонической зоны (52.65514° с.ш. 158.21907° в.д.). Максимальная глубина скважины при бурении составила 295 м, диаметры бурения изменяются по глубине скважины от 394 мм до 215 мм. По данным геолого-гидрогеологического разреза скважины в качестве основной породы представлены габбро-диориты [1]. Скважина характеризуется термальными водами сульфат-гидрокарбонат-хлоридными кальций-натриевыми с магнием и калием в катионной части состава [2].

Начиная с 2012 г. на скважине проводятся постоянные наблюдения и измерения параметров. На рис. 1 представлена термограмма скважины, данные которой были взяты в качестве исходных параметров для моделирования.

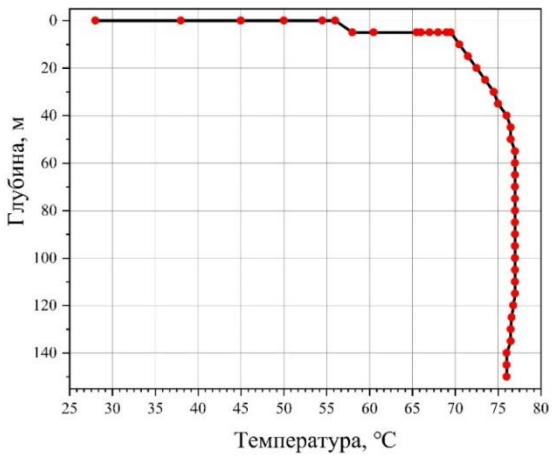


Рисунок 1 – Термограмма скважины R27

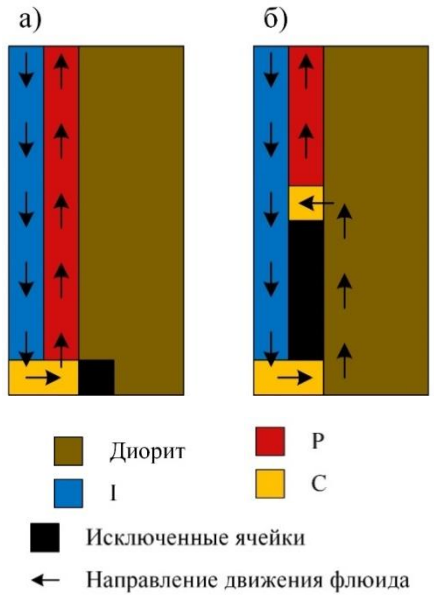


Рисунок 2 – Схематичное представление зонирования модели 1 (а) и модели 2 (б)

Моделирование объекта исследования

Для решения поставленных задач в ходе работы были рассмотрены две модели для извлечения тепла из скважины R27: 1. Модель коаксиальной геотермальной системы (рис. 2 а); 2. Модель открытой коаксиальной системы с пакером (рис. 2 б). Создание и расчет моделей проводился в программном комплексе PetraSim с численным симулятором TOUGH2 [3].

Моделируемый объект обеих моделей по форме представляет собой цилиндр, который задан в программе с помощью равномерно увеличивающейся радиальной сетки по оси 0X из 360 элементов. Внешний радиус модели составляет 50 м, глубина моделируемой подземной части равна 300 м. Параметры, определяющие радиальную сетку по оси 0X (n = 12, f = 1.754), подобраны таким образом, что ширина первой от центра ячейки и сумма первой и второй от центра ячеек соответствует радиусам общепринятых обсадных труб для скважин (d_1 = 90 мм, d_2 = 245 мм). По оси 0Z задана равномерная сетка из 30 ячеек. по оси 0Y ширина модели равна 1 м. В качестве модуля состояния флюидов для моделирования выбран EOS1 (вода).

Для описания моделей были выделены четыре материала. В моделях допущены упрощения в части грунтов окружающих скважину, поэтому материалом модели, характеризующим породу, был выбран диорит как преобладающий по данным геолого-гидрогеологического разреза скважины R27. Ячейкам определенных для инжекционной и эксплуатационной скважины был присвоен материал с высокой пористостью и проницаемость по оси 0Z. Так как границы между инжекционной и эксплуатационной скважинами, а также породой заданы в неявном виде, то для материала скважин проницаемость по оси 0X была принята достаточно низкой во избежание перетоков флюида между доменами. Для удобства и большей наглядности материал, присвоенный ячейкам инжекционной скважины, получил название I, а материал, присвоенный ячейкам эксплуатационной скважины, получил название P. Для сообщения скважин между

собой и возможности перетока флюида из скважины в породу и обратно в модели 2 на основе свойств материала скважин был задан четвертый материал С, характеризующийся высокой проницаемостью в радиальном направлении. Материалы и их свойства приведены в табл. 1.

Таблица 1. Материальные свойства

Материал	Плотность	Пористость	Проницаемость			Теплопроводность	Удельная теплоемкость
			x	y	z		
	кг/м^3	-	м^2			Вт/(м·°С)	Дж/(кг·°С)
Диорит	2810	0.2	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-13}$	3.0	1000
I	2810	0.99	$1\cdot10^{-19}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-5}$	0.6	4200
P	2810	0.99	$1\cdot10^{-19}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-5}$	0.6	4200
C	2810	0.99	$1\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-13}$	$1\cdot10^{-5}$	0.6	4200

Исходные условия моделей заданы с помощью значения температуры T 75 °C и линейной функции давления от координаты по оси 0Z: $P = 5.0 \cdot 10^4 - 1.0 \cdot 10^4 \cdot z$, Па. В качестве граничных условий для слоя ячеек, находящихся на поверхности моделей и соприкасающихся с атмосферным воздухом, были заданы фиксированные параметры: давление ($1.0 \cdot 10^5$ Па) и температура (13 °C). Для имитации теплового потока характерного для месторасположения скважины R27 параметры крайнего от центра столба ячеек (давление и температура) были зафиксированы во время расчета и не изменялись.

Инжекционная скважина задана в промежутке от 0 до −10 м и имеет параметры расхода и энтальпию 0.2 кг/с и 25 кДж/кг соответственно. Эксплуатационная скважина задана также в промежутке от 0 до −10 м и определена такими параметрами, как индекс продуктивности ($1 \cdot 10^{-10}$ м^3) и давление ($1.0 \cdot 10^5$ Па). Материальные свойства ячеек, относящихся к скважинам, описаны выше. В модели 1 ввиду высокой проницаемости в радиальном направлении материала, заданного для сообщения скважин между собой, для исключения оттока флюида через соседнюю ячейку было принято решение исключить ее из модели. В модели 2 для имитации пакера ячейки эксплуатационной скважины на глубине от −200 до −290 м исключены из модели, а ячейке, через которую флюид возвращается из породы в эксплуатационную скважину, присвоен материал С. Более наглядно распределение материалов в моделях изображено на рис. 2.

Результаты моделирования и обсуждение

При вычислении модели 1 и модели 2 за время расчета (20 лет) были достигнуты установившиеся режимы. На рисунке 3 представлены зависимости энтальпии флюида, выходящего из эксплуатационной скважины, от времени расчета модели.

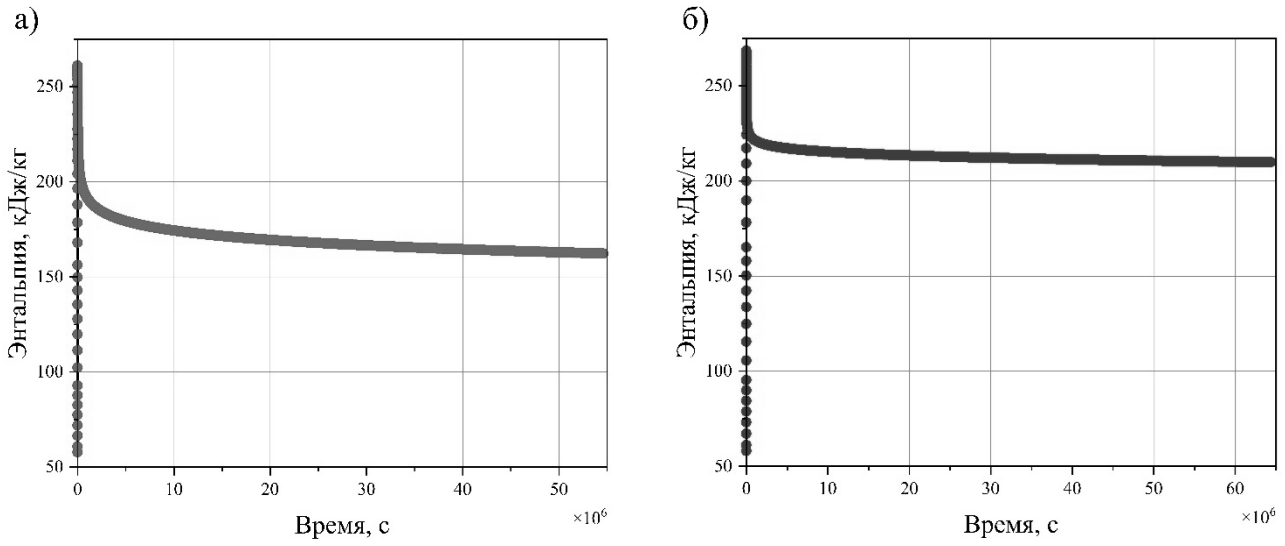


Рисунок 3 – Зависимость энтальпии флюида эксплуатационной скважины модели 1 (а) и модели 2 (б) от времени

По итогам моделирования значение энтальпии флюида в установившемся режиме составило для модели 1 – 162.21 кДж/кг, для модели 2 – 209.80 кДж/кг. Следовательно, при давлении эксплуатационной скважины $1.0 \cdot 10^5$ Па температуры воды составляют 38.72 ℃ и 50.10 ℃ соответственно. По данным результатам однозначно видно, что решение задачи теплоизвлечения из одиночной скважины гораздо лучше решается при применении модели открытой коаксиальной системы с пакером за счет увеличения проходимого флюидом пути сквозь прогретые окружающие грунты. Достигнутый результат в виде температуры воды 50.10 ℃ при расходе 0.2 кг/с позволяет говорить о возможности восстановления теплоснабжения на территории расположения рассматриваемой скважины.

В дальнейшем на основе этой работы планируется рассмотреть другие низкотемпературные скважины, находящиеся на территории Камчатского края, в качестве объектов для добычи теплоэнергии. Также на основе данной модели планируется исследовать физико-химическое взаимодействие вода-порода в рассматриваемом регионе.

Исследования выполнены при поддержке межведомственной программы комплексных научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий, реализуемой ФГБОУ ВО КамГУ им. Витуса Беринга (проект № FZSS-2025-0008).

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Связь локальной сейсмичности в Северо-Мутновской вулканотектонической зоне с аномальным изменением устьевого давления на скважине Родниковая / *А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, И.Ф. Делемень* // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы ежегодной конференции. 2014. С. 176–180.

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

3. PetraSim Geothermal Modeling Software [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.petrasim.com.

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

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

УДК 550. 344.43

Механизмы очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Кизимен (Камчатка)

М.В. Лемзиков

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

Во время извержения вулкана Кизимен в 2009–2013 гг., произошло несколько сильных с $K_{S1,2}^{Ф68}$ > 9.0 вулкано-тектонических землетрясений (ВТЗ). В работе выполнено решение механизмов очагов сильных ВТЗ вулкана Кизимен. Исходными данными были волновые формы сейсмических сигналов, зарегистрированные сетью из 20-ти радиотелеметрических сейсмических станций с глубиной очага в постройке вулкана и под фундаментом на глубинах от 3.8 до 7.5 км. Механизмы очагов определялись по полярностям первых вступлений ***P*** и ***S*** -волн с помощью готового алгоритма программы FPFIT. В результате получены 11 механизмов очагов в постойке вулкана Кизимен и 15 механизмов очагов под вулканом на глубине от 3.8 до 7.5 км. Механизмы очагов сильных ВТЗ коррелируют с геологическими разломами в этом районе.

Focal Mechanisms of Volcanic-Tectonic Earthquakes of Kizimen Volcano

Michail V. Lemzikov

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

During the 2009–2013 eruption of Kizimen Volcano, several strong volcano-tectonic earthquakes (VTE) Ks> 9.0 occurred. This study describes the focal mechanisms of strong VTEs at Kizimen Volcano. The initial data were waveforms of seismic signals recorded by a network of 20 radio telemetry seismic stations with focal depths in the volcanic edifice and beneath the basement at depths ranging from 3.8 to 7.5 km. Focal mechanisms were determined from the polarities of the first arrivals of P and S waves using a pre-defined algorithm in the FPFIT program. This resulted in 11 focal mechanisms within the edifice of Kizimen Volcano and 15 focal mechanisms beneath the volcano at depths ranging from 3.8 to 7.5 km. The focal mechanisms of strong VTE correlate with geological faults in the area.

Введение

Вулкан Кизимен с абсолютной высотой 2485 м, расположен на юго-восточном борту Щапинского грабена на полуострове Камчатка. Вулкан является действующим, тип извержений – эффузивно-эксплозивный. Он имеет коническую форму с кратером в привершинной части. Первые научные исследования вулкана датируются летом 1943 г., но, по причине ограниченных возможностей в проведении полевых наблюдений, не обнаружили следов его предпоследнего извержения 1927–1928 гг., [1].

В декабре 2010 года после более 80 лет молчания началось очередное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана, которому предшествовала слабая сейсмическая подготовка. Первые сейсмические сигналы, нового извержения, которые могли свидетельствовать о взрывах и обломочных лавинах на вулкане, появились 9 декабря 2010 г., а в ночь с 9 на 10

декабря по местному времени произошло резкое усиление сейсмической и вулканической активности [2].

В данной работе выполнено решение механизмов очагов сильных ВТЗ в 2009–2011 гг. вулкана Кизимен.

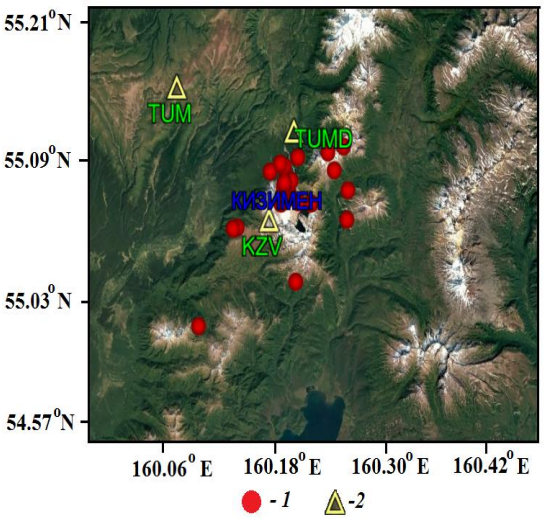


Рисунок 1 – Карта района исследования. 1 – эпицентры сильных (ВТЗ); 2 – радиотелеметрические сейсмические станции

Исходные данные

К первому типу относятся вулканические землетрясения похожие на тектонические, т.е. их очаг характеризуется как однократный толчок. Они так и называются «вулкано-тектонические» – ВТ по определению Г.С. Горшкова [3]. Вступления P и S волн четкие. Вулканические землетрясения других типов, очаг которых есть результат действия различных вулканических сил, не имеют четких вступлений S-волн.

В работе использовались сильные ВТЗ вулкана Кизимен (рис. 1). С $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 9.0$ [4].

Из архива выбирались ВТЗ с очагами в постройке вулкана Кизимен и под ним на глубинах 3.8–7.5 км. Хотя ВТЗ с очагами в постройке вулкана Кизимен содержат рассеянные волны, все же они были использованы в обработке [5].

Регистрация сильных ВТЗ проводилась 20-ю радиотелеметрическими сейсмическими станциями Камчатского филиала ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единой геофизической службы» РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН), установленными на склоне и вблизи вулканов Северной группы.

В работе для решения и построения механизмов очагов ВТЗ вулкана Кизимен использованы полярности первых вступлений *P* и *S*-волн на вертикальных каналах (SHZ) (рис. 2).

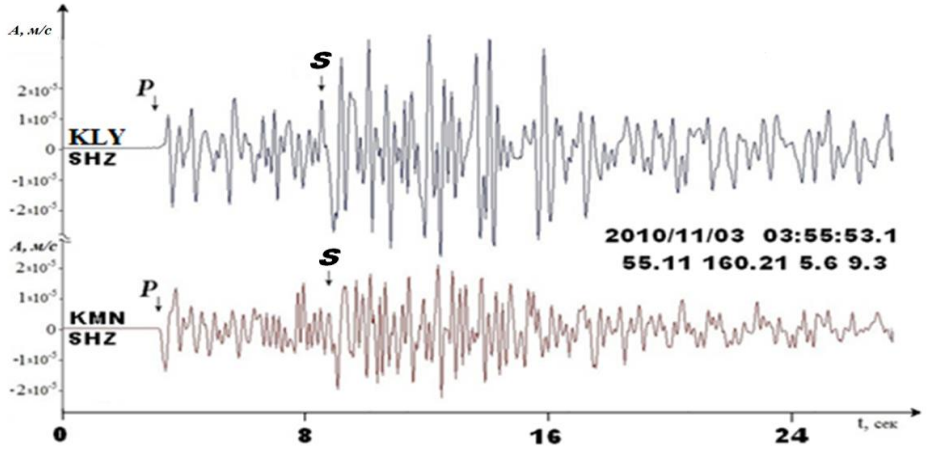


Рисунок 2 – Пример сильного ВТЗ вулкана Кизимен

Метод решения механизма очага

Метод решения механизма очага землетрясения по поляризации первых вступлений сейсмических волн широко известен [6]. Под механизмом очага землетрясения понимается ориентация в пространстве нодальных плоскостей и главных осей сжатия и растяжения. Для определения этих плоскостей используется сетка Вульфа. Со второй половины XX века для работы с ней применяются компьютерные программы. Широко известны программы: FPFIT, FPPLOT и др. [7], разработанные по идеям работ [6]. В настоящее время разработаны технологии, уточняющие процедуру решения механизма очага землетрясения с использованием первых

вступлений сейсмических волн, которые учитывают возможные ошибки в определении местоположения землетрясения, принятой модели скоростной среды, наблюдениях полярностей и углов выхода сейсмических волн. В работе использовался готовый алгоритм программы FPFIT для решения и построения механизмов очагов вулканических землетрясений вулкана Кизимен.

Обсуждение результатов

Параметры механизмов очагов сильных ВТЗ вулкана Кизимен с $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 9.0$ в постройке вулкана Кизимен приведены в (табл.1). Параметры механизмов очагов сильных ВТЗ вулкана Кизимен с $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 9.0$, на глубинах 3.8–7.5 км приведены в (табл. 2). В целом простирание первых нодальных плоскостей механизмов очагов сильных ВТЗ вулкана Кизимен определяется, как северо-восточное.

Район Щапинского грабена, где расположен вулкан Кизимен, разбит сетью разрывных тектонических нарушений. Наиболее четко выражена сложная по конфигурации система сбросов общего северо-восточного простирания. Вертикальная амплитуда сбросов колеблется здесь от 50–60 м в конце разломной зоны на северо-востоке до 170–200 метров в ее конце на юго-западе. Простирание средней части разлома около вулкана Кизимен соответствует примерно 240°. Среднее простирание нодальных плоскостей механизмов очагов в конусе 194°. Среднее простирание нодальных плоскостей механизмов очагов под вулканом Кизимен 102°.

Таблица 1. Сильные ВТЗ вулкана Кизимен с очагами в его постройке

N	**ДАТА**	**ВРЕМЯ**	**Координаты очагов**			$K_{S1,2}^{\Phi 68}$	**Механизмы очагов**		
			Fi с.ш.	**La в.д.**	**H, км**		**STR1°**	**DIP1°**	**RAKE1°**
1	10.03.2010	14:28:40.8	55.11	160.40	−1.9	10.0	294	64	108
2	28.03.2010	05:02:24.8	55.17	160.35	−2.2	9.4	46	55	−103
3	03.04.2010	01:12:25.1	55.15	160.35	−1.0	9.3	124	56	94
4	23.04.2010	04:54:12.0	55.18	160.42	−2.1	9.4	342	61	172
5	23.04.2010	10:43:15.7	55.16	160.46	0.3	10.3	23	51	−151
6	30.04.2010	16:14:05.1	55.11	160.21	−1.8	9.3	352	60	120
7	22.06.2010	07:53:19.1	55.13	160.35	−0.1	10.2	45	71	158
8	17.07.2010	02:57:08.2	55.12	160.33	0.7	9.5	161	58	−167
9	17.07.2010	02:32:03.7	55.14	160.34	−1.6	9.8	264	59	164
10	20.07.2010	13:52:37.6	55.12	160.38	0.5	9.3	298	57	−124
11	20.07.2010	13:54:14.7	55.11	160.41	−2.2	10.3	189	65	108

Примечание: STR – простирание нодальной плоскости, DIP – падение нодальной плоскости, RAKE – направление движение по плоскости разлома.

Таблица 2. Сильные ВТЗ вулкана Кизимен с очагами под фундаментом

N	**ДАТА**	**ВРЕМЯ**	**Координаты очагов**			$K_{S1,2}^{\Phi 68}$	**Механизмы очагов**		
			Fi, с.ш.	**La, в.д.**	**H, км**		**STR1°**	**DIP1°**	**RAKE1°**
1	17.08.2009	03:53:05.6	55.15	160.36	4.1	9.9	37	64	−153
2	15.09.2009	19:04:05.9	55.13	160.49	4.1	10.3	17	64	−158
3	03.10.2009	22:41:01.4	55.02	160.08	5.0	9.0	22	72	−138
4	09.10.2009	16:45:19.7	55.16	160.32	5.0	8.9	187	55	172
5	09.10.2009	16:48:38.4	55.15	160.35	5.0	9.3	197	60	−163
6	10.01.2010	08:50:04.7	55.17	160.39	6.1	9.8	34	64	−168
7	19.01.2010	21:15:50.2	55.16	160.36	6.1	9.1	26	65	−149
8	08.03.2010	08:27:31.1	55.14	160.47	6.0	9.2	39	65	−157
9	25.09.2010	22:31:02.0	55.17	160.51	4.0	9.1	224	53	121
10	09.10.2010	10:06:07.3	55.15	160.34	3.8	11.2	28	58	−163
11	03.11.2010	03:55:53.1	55.11	160.21	5.6	9.3	193	76	175
12	16.11.2010	23:14:06.6	55.15	160.35	3.9	10.7	77	53	−151
13	27.11.2010	18:57:33.3	55.10	160.47	5.5	10.4	41	39	−104
14	27.11.2010	19:29:36.0	55.15	160.36	7.5	11.9	303	69	−159
15	20.03.2011	22:44:41.1	55.05	160.32	5.7	9.7	112	72	147

Примечание: STR – простирание нодальной плоскости, DIP – падение нодальной плоскости, RAKE – направление движение по плоскости разлома.

В работе [8] обнаружена трещина, проходящая через вершину вулкана Кизимен, простирание которой составляет 290° на северо-запад. Размер трещины всего около 300 м. Трещина предположительно определена по заснеженной поверхности северной стенки кратера, в интервале высот от 2317 до 2339 м, по четкому ряду отверстий, ориентированных в направлении восток-запад.

Выводы

В работе выполнено решение механизмов очага сильных ВТЗ с $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 9.0$, которые произошли в период извержения вулкана Кизимен. Так же выполнено сопоставление нодальных плоскостей механизмов очагов сильных ВТЗ с простирание разломов в районе Щапинского грабена. В целом можно отметить, что простирание нодальных плоскостей механизмов очагов вулкана Кизимен коррелируются с геологическими разломами в этом районе.

Исследование выполнено по теме FWME-2024-007 Института Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН.

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».

Список литературы

1. *Пийп Б.И.* Вулкан Кизимен / *Б.И. Пийп* // Бюллетень вулканологическойстанции на Камчатке. 1946. № 13. С. 22–32.

2. *Сенюков С.Л.* Сейсмичность вулкана Кизимен / *С.Л. Сенюков, И.Н. Нуждина, С.Я. Дрознина и др.* // Труды третьей научно – технической конференции Проблемы комплексного геофизического мониторинга. 2010. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. С. 144–148.

3. *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.

4. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд / *С.А. Федотов*. М.: Наука. 1972. 116 с.

5. *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. Чемарев, Е.А. Матвеенко и др.* // Геофизические исследования. 2020. том 21. № 3. С. 66–91. DOI: 10.21455/gr2020.3-5

6. *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.

7. *Reasenberg P.* FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions / *P. Reasenberg, D. Oppenheine* // U.S. Geological SurveyOpen-File Report. 1985.

8. *Двигало В.Н.* Извержение 2010-2012 гг. вулкана Кизимен – самое продуктивное (по данным дистанционных наблюдений) на Камчатке в начале века. Часть I. Этап 11.11.2010. 11.12.2011. / *В.Н. Двигало, И.В. Мелекесцев, А.В. Шевченко и др.* // Вулканология и сейсмология. 2013. № 6. С. 3–21.

УДК 550.348.013.4:556.34(571.66)

Сейсмо-гидрогеодинамические эффекты в подземных водах (по данным прецизионных наблюдений в скважинах Камчатки)

Г.Н. Копылова, С.В. Болдина

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский, Россия
gala@emsd.ru

По данным прецизионной регистрации давления подземной воды в скважинах, расположенных в ближней зоне очага Камчатского мега-землетрясения 2025 г., Mw = 8.8, рассматриваются гидрогеодинамические эффекты воздействия сейсмических волн, ко-сейсмическое изменение давления и его постсейсмическое восстановление. Полученные данные используются для развития типизации сейсмогидрогеодинамических эффектов в скважинах сейсмоактивных регионов.

Seismo-Hydrogeodynamic Effects in Groundwaters (Based on Precision Observations in Kamchatka Wells)

Galina N. Kopylova, Svetlana V. Boldina

Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Kamchatka Branch, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia

According to precision measurements of groundwater pressure in wells located in the near zone of the 2025 Kamchatka mega-earthquake's source, the hydrogeodynamic effects of seismic waves, coseismic pressure changes and postseismic recovery are considered. The obtained data are used for the development of a typification of seismohydrogeodynamic effects in wells in seismically active regions.

Разработка типизации сейсмогидрогеодинамических эффектов (СГГЭ) в скважинах является важной задачей в изучении влияния землетрясений на режим подземных вод сейсмоактивных регионов. При создании такой типизации учитываются механизмы воздействия землетрясений на состояние системы скважина – водовмещающая порода, а также продолжительность и морфологические особенности изменений уровня/давления воды. Зарегистрированные в пьезометрических скважинах СГГЭ обычно разделяются на: 1 – кратковременные косейсмические эффекты, обусловленные динамическим воздействием сейсмических волн и изменением статического напряженного состояния водоносных горизонтов при образовании разрыва в очаге землетрясения; 2 – долговременные постсейсмические изменения давления вследствие комплексного воздействия землетрясения на состояние контролируемого водоносного горизонта за счет изменения проницаемости водовмещающих пород и гидродинамической связности с сопряженными водоносными структурами [1]. Также имеются сообщения о гидрогеодинамических аномалиях перед землетрясениями или гидрогеодинамических предвестниках с описаниями гипотетических механизмов их образования, в т. ч. на примере скважин Камчатки [2, 3]. Вместе с тем, бесспорные доказательства использования гидрогеодинамических предвестников для прогнозирования сильных землетрясений пока отсутствуют.

В основу разрабатываемой типизации сейсмогидрогеодинамических эффектов положена техническая обоснованность выделения их генетических и морфологических типов с учетом средств регистрации вариаций давления воды в скважинах и методов обработки и визуализации исходных данных. При таком подходе, более обоснованным является разделение СГГЭ на высокочастотные эффекты, регистрируемые при наблюдениях с частотой ≥1 Гц, и на длиннопериодные вариации, проявляющиеся в среднечасовых – среднесуточных изменениях давления с компенсированным воздействием переменной барометрической нагрузки и других факторов, влияющих на изменения давления в водоносном горизонте.

В период Камчатского мега-землетрясения 29 июля 2025 г., $M_w = 8.8$ (МЗ) [4], его сильных ($M_w \geq 6$–7) фор- и афтершоков были зарегистрированы СГГЭ по данным прецизионных наблюдений (1 – 20 Гц, точность ±0.1 гПа) в скважинах на территории Петропавловск-Камчатского полигона, Восточная Камчатка.

Наблюдательная сеть

Скважины вскрывают на глубинах 310–800 м напорные пресные холодные подземные воды в породах неогенового и мелового возраста с трещинной проницаемостью. Описание системы наблюдений приводится в [5]. Продолжительность наблюдений за вариациями уровня/давления воды в отдельных скважинах составляет 5–38 лет.

По данным 1996–2024 гг., в трех пьезометрических скважинах были зарегистрированы СГГЭ в диапазоне периодов от минут до суток и десятков-сотен суток при местных землетрясениях с $M_w = 5.0$–7.8 на расстояниях 70–800 км. Колебания уровня воды при сильнейших, $M_w = 7.6$–9.1 телесейсмических землетрясениях проявлялись на расстояниях до 14.5 тыс. км. Многообразие проявлений СГГЭ определяется строением скважин, локальными гидрогеологическими условиями, в частности, наличием повышенных концентраций газа в составе подземной воды, а также различной интенсивностью сейсмического воздействия в зависимости от величины магнитуды, удаленности и пространственного расположения скважин по отношению к очагам землетрясений [6].

Построение диаграмм зависимости выделенных типов СГГЭ от параметров землетрясений для каждой наблюдательной скважины является эффективным способом представления особенностей их реагирования на сейсмические воздействия. Диаграммы типизации СГГЭ, зарегистрированных в четырех скважинах Камчатки по данным на конец 2024 г., представлены в [7].

Сейсмичность в 2025 г.

Камчатское МЗ, его форшок с $M_w = 7.4$, два афтершока в сентябре с $M_w = 7.4$ и 7.8; другие сильные события активной фазы афтершокового процесса в июле – ноябре 2025 г. (всего 15 событий), сопровождались косейсмическими эффектами в пьезометрических скважинах. Для характеристики интенсивности воздействия отдельных землетрясений в районе скважин используется величина соотношения между гипоцентральным расстоянием d_h и максимальным линейным размером очага землетрясения L [8]. Величина d_h/L показывает относительную удаленность скважины от гипоцентра в размерах очага землетрясения. Для четырех землетрясений с $M_w = 7.4$–8.8 величины $d_h/L = 0.5$–2.3, т. е. при таких землетрясениях скважины находились в ближних зонах их очагов. Для других рассматриваемых землетрясений с $M_w = 5.7$–7.0 величины d_h/L составляли 2.7–9.3, что соответствует расположению скважин в промежуточных (средних) зонах их очагов.

Сейсмогидрогеодинамические эффекты в ближней зоне очагов землетрясений

Новый тип косейсмического эффекта в изменениях давления воды был обнаружен при расположении наблюдательных скважин в ближней зоне очагов сильнейших субдукционных землетрясений. В скважинах ЮЗ-5 (рис. 1) и 1303 при четырех сильнейших землетрясениях происходили понижения давления с амплитудами в десятки – сотни гПа в течение 0.5–1.3 ч. На рис. 1 показаны вариации давления во время прохождения сейсмических волн от МЗ (3.5–5 минут) на фоне *аномального* косейсмического понижения с амплитудой 442 гПа в течение 1 ч 20 мин. При этом величина объемной деформации водовмещающих пород по [6] составила 2.8×10^{-6}. По модели дислокационного источника с параметрами механизма очага МЗ характер деформации в районе скважин соответствовал объемному расширению водовмещающих пород с амплитудой $\approx2\times10^{-6}$ и согласовался с данными спутниковой геодезии и интерферометрии, а также с изменениями гидрогеологических параметров в скважинах Паратунского, Пиначевского, Кеткинского и Вилючинского термальных полей (падение давления, уменьшение разгрузки вплоть до прекращения самоизлива) [9].

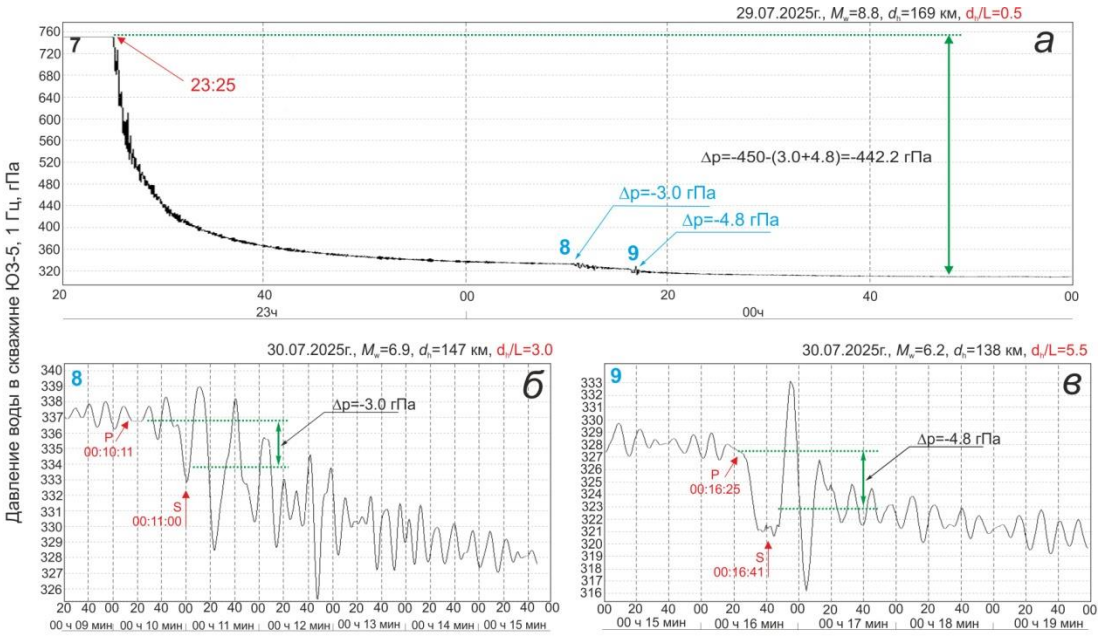


Рисунок 1 – Изменения давления воды в скв. ЮЗ-5 при МЗ, включающие косейсмическое понижение с амплитудой 442 гПа в течение 1 ч 20 мин (а) и при афтершоках 8 и 9 с амплитудами 3 гПа (б) и 4.8 гПа (в), оцененными по данным в интервале между вступлениями P и S-волн

В течение косейсмического понижения давления при МЗ произошли афтершоки (указаны цифрами 8 и 9 на рис. 1*а*), которые сопровождались понижениями давления с амплитудами 3.0 и 4.8 гПа (рис. 1*б, в*). В случаях этих афтершоков, а также других землетрясений с $M_w < 7.4$, косейсмические амплитуды оценивались по разности между средними значениями давления при прохождении P и S-волн.

На рис. 2 демонстрируются осцилляции давления при динамическом воздействии объемных P и S-волн и поверхностных волн Рэлея L_R. Высокочастотные колебания давления при прохождении объемных волн были обусловлены вертикальными движениями ствола скважины, его «тряской» (рис. 2*в*). Вступление поверхностных волн Релея сопровождалось усилением вариаций давления в скважине с проявлением гармонических компонент с периодами ≈20–30 с в записи давления воды (рис. 2*г*).

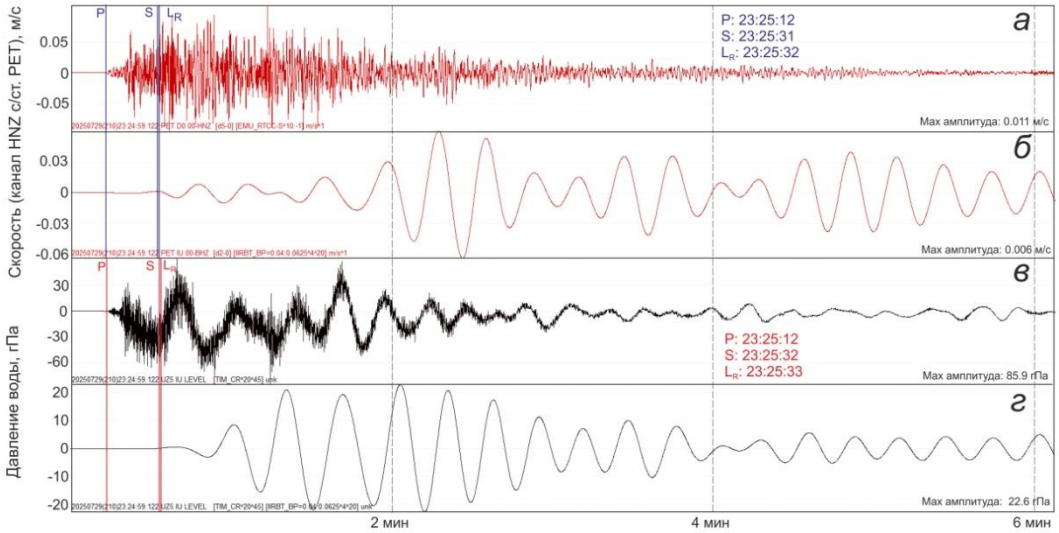


Рисунок 2 – Сейсмическая запись МЗ на сейсмостанции «Петропавловск» (а), гидросейсмограмма вариаций давления воды в скважине ЮЗ-5 в диапазоне частот ≥0.022 Гц (периоды вариаций ≤45 с) (в) и выделенные низкочастотные составляющие (0.06 – 0.04 Гц, периоды 16 – 23 с) в сейсмической записи (б) и в вариациях давления воды (г)

Восстановление (повышение) давления в скв. ЮЗ-5 после МЗ и его сильнейших афтершоков продолжается до настоящего времени (июль 2026 г.) и относится к длиннопериодным СГГЭ. В скв. 1303 восстановление давления закончилось в октябре 2025 г.

Результаты.

Выделен новый тип СГГЭ в пьезометрических скважинах, расположенных в ближней зоне очагов субдукционных землетрясений взбросового типа с M_w = 7.4–8.8 и d_h/L = 0.5–2.3, который характеризуется наложением высокочастотных вариаций давления при прохождении сейсмических волн на значительное (до сотен гПа) косейсмическое понижение давления подземной воды в течение десятков минут – 1.3 ч с последующим длительным восстановлением в течение месяцев.

Амплитуды косейсмического понижения давления в скв. ЮЗ-5 при 15-ти землетрясениях в июле-ноябре 2025 г. с M_w = 5.7–8.8 составляли 0.2–442 гПа. Величины объемной косейсмической деформации водовмещающих пород по данным скважинных наблюдений составляют ед.$\times 10^{-9}$ – ед.$\times 10^{-6}$ и согласуются в пределах одного порядка с величинами, полученными по модели дислокационного источника с параметрами механизмов очагов землетрясений по каталогу GlobalCMT. Это показывает, что зарегистрированные эффекты косейсмического понижения давления воды в наблюдательных скважинах вблизи очагов сильных субдукционных землетрясений могут использоваться для количественной оценки косейсмической деформации.

Работа выполнена по Госзаданию № 075-00609-26 ФИЦ ЕГС РАН с использованием данных, полученных на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга РФ, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Wang C.-Y.* Earthquakes and Water / *C.-Y. Wang, M. Manga* // Springer: Berlin, Germany. 2010. 225 P.

2. *Kopylova G.N.* Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula / *G.N. Kopylova, S.V. Boldina* // Frontiers Earth Sciences. 2020. V. 8. P. 576017. DOI: 10.3389/feart.2020.576017.

3. *Кирюхин А.В.* О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре / *А.В. Кирюхин, В.А. Корнеев, А.Ю. Поляков* // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 3–11.

4. *Чебров Д.В.* Камчатское мега-землетрясение 29 июля 2025 г. (Mw=8.8) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2025. № 3. Вып. № 67. С. 113–117.

5. *Болдина С.В.* Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка / *С.В. Болдина, Г.Н. Копылова, В.А. Кобзев* // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. С. 0594.

6. *Kopylova G.N.* Verification of Seismo-hydrogeodynamic Effect Typifications Recorded in Wells on the Kamchatka Peninsula: The April 3, 2023 Earthquake, Mw=6.6 as an Example / *G.N. Kopylova, S.V. Boldina* // Water. 2025. V. 17. P. 634. DOI: 10.3390/w17050634.

7. *Копылова Г.Н.* Сейсмо-гидрогеодинамические эффекты в изменениях давления подземной воды (по данным многолетних наблюдений в скважинах Камчатки) / *Г.Н. Копылова, С.В. Болдина* // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Десятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 28 сентября – 04 октября 2025 г., г. Петропавловск-Камчатский. С. 52–57.

8. *Завьялов А.Д.* Новый способ определения характерного размера очаговой зоны / *А.Д. Завьялов, О.Д. Зотов* // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 22–29.

9. *Solomatin A.V.* Response of Geofluid Systems to the Activization of Regional Seismicity in Kamchatka in July 2025 / *A.V. Solomatin, A.V. Kiryukhin, A.Yu. Polyakov, M.V. Lemzikov, D.N. Burnaikin, V.P. Petrochenko, G.N. Kopylova, G.V. Ryabinin, Yu.V. Demyanchuk, O.O. Usacheva* // Russian Journal of Earth Sciences. 2026. ES2014. EDN: ORNLAF. DOI: 10.2205/2026es001124.

УДК 550.34+550.341+550.343

Развитие сейсмического процесса в очаге Камчатского мегаземлетрясения 2025 г. и прогноз опасности для юго-восточного побережья Камчатки последующих сейсмических событий

А.В. Соломатин

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

На основе детального каталога землетрясений Камчатского филиала ЕГС РАН изучен очаг мегаземлетрясения 29 июля 2025 г. с M = 8.8. Показано, что его положение и границы практически совпадают с очагом катастрофического события 1952 г., что подтверждает представления С.А. Федотова о сегментации Курило-Камчатской сейсмогенной зоны. С помощью метода ячеек Вороного проведена предельная детализация плотности эпицентрального поля афтершоков. Выявлены временные вариации пространственной плотности сейсмичности и роль глубинных флюидов, поступающих по трансформным разломам. Развита концепция информационной определенности для анализа динамики спектральных характеристик сейсмического процесса. Обсуждаются возможности долгосрочного прогноза опасных событий на юго-восточном побережье Камчатки.

Development of the Seismic Process in the Source Zone of the 2025 Kamchatka Megathrust Earthquake and Hazard Forecast for Subsequent Seismic Events on the Southeastern Coast of Kamchatka

Alexey V. Solomatin

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

Based on a detailed earthquake catalog from the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of RAS, the source of the megathrust earthquake of July 29, 2025 (M = 8.8) has been studied. Its location and boundaries are shown to nearly coincide with those of the 1952 catastrophic event, confirming S.A. Fedotov's concept of segmentation of the Kuril–Kamchatka seismogenic zone. Using the Voronoi tessellation method, we achieved an extreme detail of the density of the aftershock epicentral field. Temporal variations in spatial seismicity density and the role of deep fluids supplied through transform faults were revealed. The concept of informational determinacy was extended to analyze the dynamics of spectral characteristics of the seismic process. Implications for long-term hazard forecasting on the southeastern coast of Kamchatka are discussed.

Введение

Очаг землетрясения 29.07.2025 г. с M = 8.8 на Камчатке, в подтверждение идеи академика С.А. Федотова о сегментации Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, практически совпал с очагом мегаземлетрясения 1952 г. Хотя это событие 2025 г. произошло на 7 лет раньше расчетного срока наступления III стадии сейсмического цикла согласно базовым положениям метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП), ускоренный темп накопления сейсмической энергии, отмеченный еще в [1], обеспечил достижение порогового уровня именно к этому времени.

Близость эпицентров и совпадение границ очагов мегаземлетрясений 1952 и 2025 гг., а также анализ характера развития афтершокового процесса последнего из них, позволили сделать выводы о значимом влиянии на сейсмический режим глубинных флюидов и трансформных разломов. Последние не только определяют поперечную сегментацию очага 2025 г., но и служат проводниками флюидной компоненты.

Цель настоящей работы − детальное изучение пространственно-временной структуры афтершокового процесса данного события и оценка возможности уточнения таким образом долгосрочного прогноза сейсмической опасности на юго-восточном побережье Камчатки. Основу методологического подхода составляет предельная детализация плотности эпицентрального поля на основе построения ячеек Вороного для него, а также применение концепции информационной определенности.

Материалы и методика их обработка

Выборка составлена по региональному каталогу Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН за афтершоковый период с 29.07.2025 по 28.08.2026. Для полноты каталога нижний порог ограничен $K = 9$, а пропуски слабых событий скорректированы переходом к обобщенному энергетическому классу [2]. Пространственные границы (48–56° с.ш., 150–164° в.д.) расширены для надежного оконтуривания афтершоков; редкие внешние события не вносят значимых искажений в оценки. Глубины не ограничивались, поскольку анализ в эпицентральной проекции корректен для выделения долговременных структур.

Для оценки плотности эпицентров построена диаграмма Вороного; плотность в каждой точке обратно пропорциональна площади соответствующей ячейки. С использованием графика повторяемости (наклон 0.5 по шкале K^F) и нормировки по времени эта плотность условно переведена в параметр $Lg(A_{10})$ – переход условен из-за несопоставимости локальных и площадных оценок в неоднородном поле.

Как и в предшествующих работах [3], использовалась информационная определенность временных вариаций исследуемых параметров. Развитие этого подхода в настоящей работе заключается в анализе не самих значений параметров, а разностей их последовательных значений.

Вторая ключевая особенность выбранной методики – максимально детальный анализ временного процесса кластеризации сейсмических событий. Для этого введены следующие гипотезы: (1) единый характер развития процесса, определяемый внешними факторами; (2) постоянство локализаций сейсмических активизаций как отражение флюидной инжекции на пересечениях разломов. В рамках модели фонового процесса локальные активизации, как показано далее, контролируются преимущественно флюидной составляющей.

Обработка данных и получение графических материалов для анализа

В соответствии с указанными выше методиками были получены: максимально детальная карта логарифма параметра A_{10} (рис. 1), а также временные ряды величин параметров $F \sim 1/S$ и K. Первый из этих параметров определяет уровень кластерной активностина основе S – области окружающих текущее событие соседними, произошедшими в течение всего времени используемой выборки. Кластер подобных областей и формирует, как правило, локальные активизации. Второй из этих параметров определяет величины сейсмических событий на основе шкалы K^F.

Как было отмечено выше, в настоящей работе для анализа использовались спектры разностей последовательных по времени величин указанных параметров: $P(F_i - F_{i-1})$ и $P(K_i - K_{i-1})$, где i – номер текущего события в общей временной выборке $1 \ldots N$. Тем не менее, вариации спектра этих разностей анализировался в соответствии с общей концепцией информационной определенности [3], рис. 2. Промежутки времени между последовательными событиями не учитывались, т.к. использовалась достаточно распространенная пособытийная интерпретация временного хода.

Выгода указанного подхода на основе предварительного построения разностей и линеаризации их спектра состоит как в исключении тяжелых хвостов вариаций

используемых параметров, так и в существенном подавлении их длительных трендов, в частности простой линейный тренд будет исключен полностью.

Второй важной особенностью исследования является преобразование исходных параметров к единому виду – информационной определенности [3], что дает простую возможность оценки нормированной кластеризации на основе вычета из оценки активности подвижек общей активности.

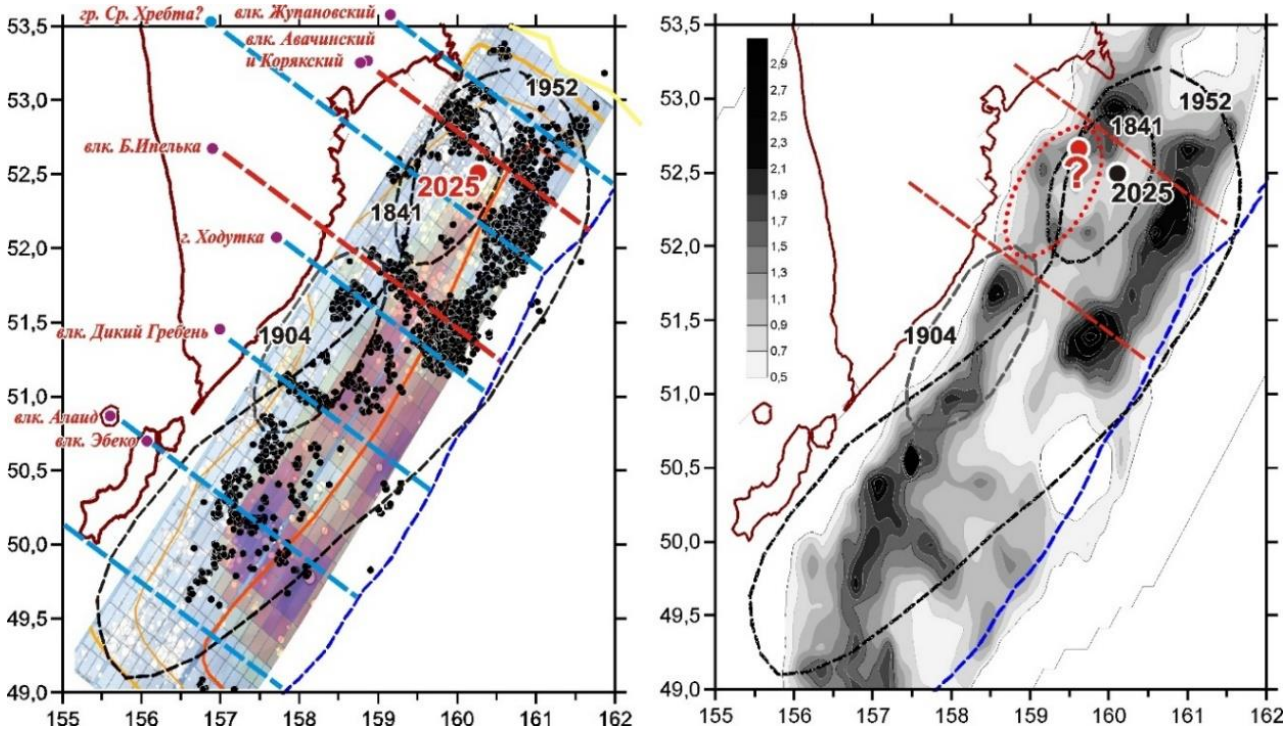


Рисунок 1 – Эпицентры, представляющие наибольшую плотность сейсмических активизаций за первые пять месяцев афтершокового процесса мегаземлетрясения 29 июля 2025 г. (слева) и карта плотности $Lg(A_{10})$ для него по 28 августа 2026 г. (справа). На левом рисунке представлена карта подвижек в магистральном разрыве по данным NEIC (максимальные до 40 м. – темные области). Представлены граница очага предыдущего мегаземлетрясения в 1952 г., а также границы очагов сильнейших землетрясений 1841 и 1904 гг. Синей пунктирной линией указано положение глубоководного желоба, а голубые и красные пунктиры маркируют положение гипотетических трансформных разломов. На правом рисунке указана также сейсмическая брешь, оставшаяся после мегаземлетрясения 2025 г.

Прежде всего заметим, что обе оценки активности подобны за исключением отдельных временных периодов, что неудивительно, т.к. они, по-видимому, в существенной мере определяются общими геодинамическими условиями. Тем не менее, в отдельные периоды они ведут себя по-разному. Можно предположить, что именно в это время проявляется действие флюидной компоненты.

Анализ активности сейсмических подвижек на основе параметра *K* (рис. 2) указывает на 3–4-часовую задержку начала релаксации области главной подвижки после главного события. В этот период общая активность сейсмических подвижек проявляется аномальными по величине событиями, но при этом в информационном представлении – без учета этих аномалий близка к среднему уровню.

Затем релаксационный процесс резко начинает активизироваться в целом, достигая максимума за первые 5–6 суток и оформляя в этот период общую зону афтершокового процесса. При этом в первые сутки (~22 часа) степень кластеризации резко понижается, т.к. процесс расширения области релаксации захватывает зоны вне потенциальных центров инжекции флюидов.

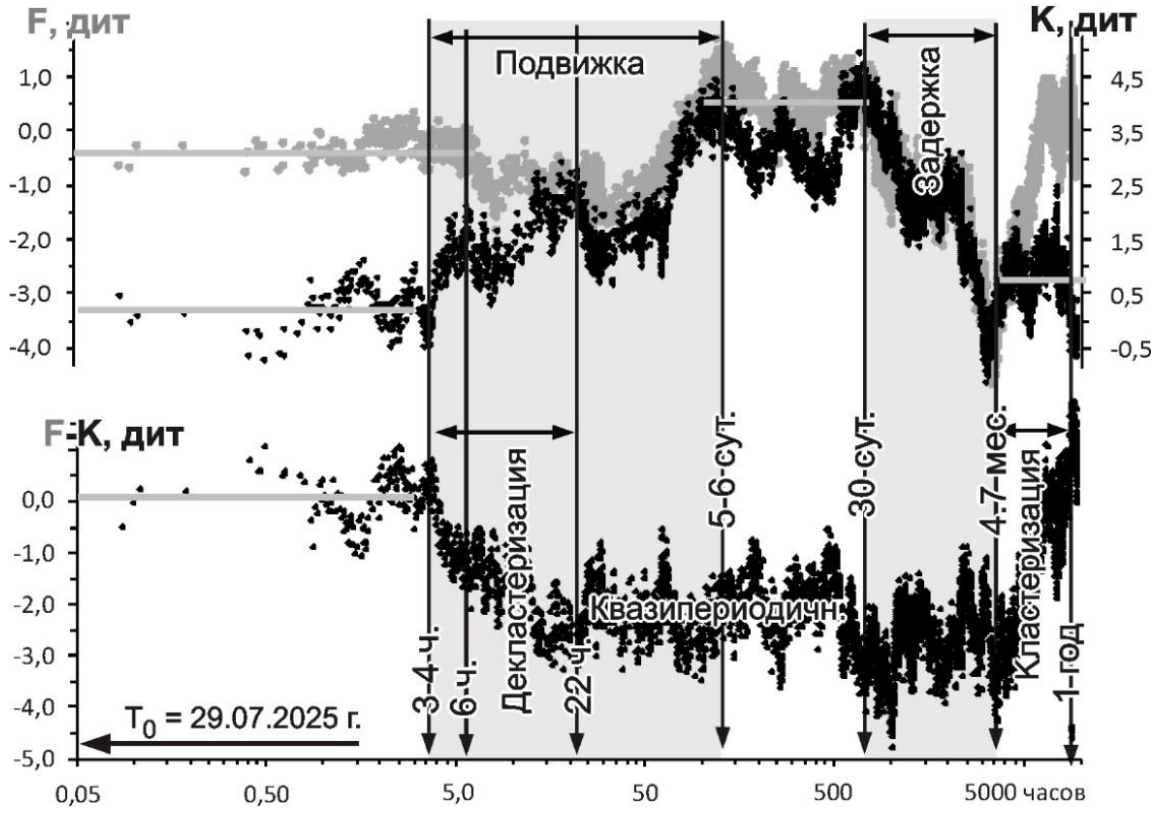


Рисунок 2 – Анализ развития сейсмического процесса на основе параметров F (уровень кластерной активности, серые точки), K (уровень общей активности, черные точки) – верхние графики, а также разностей этих параметров (степень кластеризации) – нижний график. Подробности в тексте

После первых суток афтершоков процесс кластерной-флюидной активности держится примерно на постоянном низком уровне с периодическими колебаниями возле него, но критически растет через 4–5 месяцев после главного события. В этот период существенно активизируются центры инжекции флюидов. Достаточно характерно, что за 3–4 месяца до этого наблюдалась существенная задержка в развитии афтершокового процесса, связанная с перераспределением напряжений после землетрясения с M = 7.8, произошедшего 18 сентября 2025 г. вблизи северо-восточной границы очага мегаземлетрясения 29 июля.

Заключение и выводы

Представленные динамические и флюидодинамические оценки развития геосреды в области афтершокового процесса требуют дальнейшего исследования и уточнения по мере накопления данных. Тем не менее, полученные результаты позволяют сформулировать логичные и содержательные выводы, в целом подтверждающие перспективность использованного информационного подхода.

Ключевым результатом работы является обоснование триггерной природы развития афтершокового процесса, наиболее вероятным механизмом которой служит механизм инжекции и распространения глубинных флюидов. При этом идентифицированы конкретные реперные точки этих триггерных эффектов.

В целом, даже без привлечения детальной динамической модели, построенной в настоящей работе, полученные данные убедительно демонстрируют, что развитые в ней методы анализа на основе информационной определенности позволяют выделять устойчивые пространственно-временные закономерности, значимые для последующего мониторинга и оценки сейсмической опасности в районе юго-восточного побережья Камчатки.

Особое внимание следует уделить сейсмической бреши в районе Авачинского залива, оставшейся после мегаземлетрясения 2025 г. Как показывает сравнение сейсмических эффектов Камчатских мегаземлетрясений 1952 и 2025 гг. с одной стороны и значительно меньшего по величине Олюторского землетрясения 1959 г. в прибрежной зоне – с другой, именно близкие, пусть и не самые мощные землетрясения представляют максимальную угрозу возникновения 8–9-балльных сотрясений на побережье.

Исследование выполнено в рамках проекта FWME-2024-0007 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Список литературы

1. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010 – VIII 2015 гг., достоверность предыдущих прогнозов и их применение / *С.А. Федотов, А.В. Соломатин, С.Д. Чернышев* // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 3–27.

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

3. *Соломатин А.В.* О сейсмическом прогнозе, связи сейсмических и геодинамических процессов и концепции информационной определенности // Вулканология и сейсмология. 2025. № 1. С. 78–91.

РАЗДЕЛ IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ (ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС, ГЕОМЕХАНИКА, ХИМИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ)

CHAPTER IV. MODELING OF GEOFLUID SYSTEMS (HEAT AND MASS TRANSFER, GEOMECHANICS, CHEMICAL TRANSPORT AND INTERACTIONS)

УДК 532.546

Реология пористых сред с пористым скелетом переменной массы

М.Г. Храмченков

НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, 123182, Россия
mkhramch@gmail.com

Построены реологические соотношения для деформируемых пористых сред с пористым скелетом переменной массы. На основе полученных соотношений дано объяснение эффектов, возникающих при решении задач геомеханики для горных пород в ходе процессов, сопровождающихся изменением их массы.

Rheology of Porous Media with a Porous Skeleton of Variable Mass

Maxim G. Khramchenkov

NRC «Kurchatov Institut», Moscow, Russia

Rheological relationships are constructed for deformable porous media with a porous skeleton of variable mass. Based on these relationships, an explanation is given for the effects that arise when solving geomechanical problems for rocks during processes accompanied by changes in their mass.

Введение

Одним из этапов (часто завершающим) изучения закономерностей тепломассопереноса и трансформации вещества в ходе сложных геологических процессов (преобразование горных пород в ходе процессов метаморфизма, преобразования вмещающих горных пород при интрузиях магмы, изменение состава вмещающих горных пород под действием горячих газов (пневматолитовые процессы) или растворов (гидротермальные процессы)) является математическое моделирование. Математическая модель представляет собой систему уравнений (как правило, дифференциальных), описывающих весь комплекс сопутствующих явлений, как правило, на базе концепций механики сплошной среды. Безусловно, математическая модель, претендующая на хотя бы достаточную полноту описания всего комплекса вышеперечисленных процессов, должна быть исключительно сложной в силу сложности и взаимосвязанности кристаллохимических, минералогических, физических и химических сопутствующих явлений. В силу этого естественной реакцией специалистов по моделированию является стремление к редукции, т.е. упрощению описания, выражающемуся в сокращении числа уравнений и констант, подлежащих экспериментальному определению. Редукционизм имеет в этом случае обоюдоострый характер. С одной стороны, он позволяет быстрее достичь цели моделирования, с другой – может быть недопустимо тривиальным. Нет нужды говорить, что те процессы, которые были обозначены выше, для своего корректного отражения должны существенным образом требовать включения в состав соответствующей модели деформации горных пород и их взаимосвязь с возникающими в горной породе напряжениями. Такая взаимосвязь изучается особой наукой, составной частью механики сплошной среды, – реологией. Особую

сложность реологические соотношения приобретают в случае протекания явлений в горных породах, как правило, пористых. Задача, которая была решена в рамках данной работы, может быть сформулирована следующим образом: необходимо получить корректные реологические соотношения для пористых сред с пористым скелетом переменной массы за счет процессов массообмена, протекающих в горных породах. Необходимо заметить, что автор уже пытался разработать модель, соответствующую заявленной цели, но именно в части подходящей реологии разработать ранее такую модель все-таки исчерпывающим образом не удалось [1, 2]. Полного анализа данной проблемы нет и других исследованиях на эту тему, из которых отметим работы [3, 4]. В этой работе будет использован другой подход, основы которого были заложены профессором А.В. Костериным в [5].

Основные соотношения геомеханики пористых сред с пористым скелетом переменной массы

Введем следующие обозначения: G – внешняя нагрузка; M_s – масса вещества пористого скелета; p – давление в жидкости; Us – внутренняя энергия скелета; Ss – энтропия твердой фазы; δQ(e) – внешний поток тепла; δQ′≥0 – некомпенсированноетепло; δA(i) – элементарная работа внутренних поверхностных сил; N_s – количество молей вещества твердой фазы; V_0 – объем представительного элемента пористой среды; V_s – объем твердой фазы в составе представительного элемента объема; v_s – молярный объем вещества твердой фазы; ui – компоненты вектора скорости перемещения частиц скелета; i_{ij}^s – девиатор σ_{ij}^s; $\dot{V}_s$ – скорость изменения объема твердой фазы; eij – тензор скоростей деформаций; θ – дилатация; ρ_w – плотность водной фазы; ρ_s – плотность твердой фазы; σ_{ij}^f – тензор эффективных напряжений; $\sigma = -(1/3)\sigma_{ii}^s$ – давление в твердой фазе; μ_s – химический потенциал вещества твердой фазы; λ, μ, ν – упругие постоянные; нижний индекс «s» означает твердую фазу (solid); нижний индекс «w» означает воду (water).

Теперь дадим определения дилатации среды, представительного объема (ПЭО) и массы ПЭО

$$\theta = (V - V_0)/V_0 \tag{1}$$

$$V = V_0 \exp\theta . \tag{2}$$

$$M_s = (1-m)\rho_s V_0 \exp\theta . \tag{3}$$

Продифференцируем последнее уравнение по времени и преобразуем результат к виду:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{(1-m)}{\rho_s}\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + (1-m)\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{(1-m)}{M_s}\frac{\partial M_s}{\partial t} . \tag{4}$$

Запишем теперь условия механического равновесия. Предположим, что к глине приложена внешняя нагрузка *G*. Тогда распределение нагрузки между компонентами среды запишется в виде

$$G_{ij} = (1-m)\sigma_{ij} - mp\delta_{ij}$$

который, после обозначения $(1-m)(\sigma_{ij} + p\delta_{ij}) = \sigma_{ij}^f$ переходит в соотношение Терцаги

$$G_{ij} = \sigma_{ij}^{f} - p\delta_{ij}. \tag{5}$$

Здесь p – давление в жидкости, физический смысл введения σ_{ij}^{f} будет раскрыт ниже.

Реологические соотношения для пористых сред с переменной массой скелета

Перейдем к термодинамическому равновесию. Выразим свободную энергию твердой фазы через макропараметры σ^{f}, m, θ. Для этого запишем первый и второй закон термодинамики для твердой фазы переменной массы:

$$\mathrm{d}U_s = \delta Q^{(e)} + \delta A^{(i)} + \mu_s dN_s, \quad T\,\mathrm{d}S_s = \delta Q^{(e)} + \delta Q'. \tag{6}$$

В изотермических условиях

$$\delta A^{(i)} = \mathrm{d}U_s - \delta Q^{(e)} - \mu_s dN_s = \mathrm{d}U_s - T\,\mathrm{d}S_s + \delta Q' - \mu_s dN_s =$$
$$= \mathrm{d}F_s - \mu_s dN_s + \delta Q'$$

Тогда в условиях отсутствия массовых сил имеем

$$\frac{\delta A^{(i)}}{\mathrm{dt}} = \dot{F}_s - (\mu_s / \nu_s)\dot{V}_s + \frac{\delta Q'}{\mathrm{dt}} = \int\limits_{V_s} \sigma_{ij}^{s} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\,\mathrm{dV} = \int\limits_{V_s} \frac{\partial \sigma_{ij}^{s} u_i}{\partial x_i}\,\mathrm{dV}, \tag{7}$$

Преобразуем объемный интеграл в последнем соотношении в поверхностный:

$$\frac{\delta A^{(i)}}{\mathrm{dt}} = \int\limits_{\sum_s} \sigma_{ij}^{s} n_j u_i\,\mathrm{ds} = \int\limits_{S_e^s} i_{ij}^{s} n_j u_i\,\mathrm{ds} + \int\limits_{S_e^s} (-\sigma + p) u_i n_i\,\mathrm{ds} + \int\limits_{S_e^s} -p u_i n_i\,\mathrm{ds} + \int\limits_{S_{s-w}} -p u_i n_i\,\mathrm{ds} =$$
$$= \int\limits_{S_e^s} i_{ij}^{s} n_j u_i\,\mathrm{ds} + \int\limits_{S_e^s} (-\sigma + p) u_i n_i\,\mathrm{ds} - \int\limits_{\sum_s} p u_i n_i\,\mathrm{ds}$$

Переходя к средним по представительному объему, получим

$$\frac{\delta A^{(i)}}{\mathrm{dt}} = \int\limits_{V_0} \frac{\partial(\sigma_{ij}^{f} \langle u_i \rangle)}{\partial x_i}\,\mathrm{dV}_0 + (-p) \int\limits_{\sum_s} u_i n_i\,\mathrm{d}s, \tag{8}$$

Здесь

$$\sigma_{ij}^{f} = (1-m)(\langle i_{ij}^{s} \rangle - \langle \sigma - p \rangle \delta_{ij})$$

есть тензор эффективных напряжений. Очевидно, что

$$\int\limits_{\sum_s} u_i n_i\,\mathrm{dS} = \dot{V}_s$$

Здесь $\dot{V}_s$ – скорость изменения объема твердой фазы. Тогда из условия $\rho_s V_s = M_s$ получаем

$$\dot{\rho}_s V_s + \rho_s \dot{V}_s = \dot{M}_s \Rightarrow \dot{V}_s = -\dot{\rho}_s V_s / \rho_s + \dot{M}_s / \rho_s \tag{9}$$

Из соотношения (4) следует:

$$\dot{M}_s / \rho_s = V_0[-\dot{m} + (1-m)\dot{\rho}_s / \rho_s + (1-m)\dot{\theta}].$$

$$\dot{V}_s = -\dot{\rho}_s V_s / \rho_s + \dot{M}_s / \rho_s = V_0[-\dot{m} + (1-m)\dot{\theta}]$$

Отсюда следует

$$(-p)\int_{\sum_s} u_i n_i \,\mathrm{d}s = -pV_0[-\dot{m}+(1-m)\dot{\theta}].$$

Тогда для скорости изменения свободной энергии получаем

$$\frac{1}{V_0}(\dot{F}_s-(\mu_s/\nu_s)\dot{V}_s+\frac{\delta Q'}{\mathrm{dt}}) = \sigma_{ij}^f e_{ij} - p[-\dot{m}+(1-m)\dot{\theta}],$$

где e_{ij} – тензор скоростей деформаций. Рассмотрим упругий скелет, т. е. случай $\delta Q'/dt=0$:

$$\dot{F}_s/V_0 = T_{ij}e'_{ij} - \sigma^f\dot{\theta} + [(\mu_s/\nu_s)-p][-\dot{m}+(1-m)\dot{\theta}]. \qquad (10)$$

Здесь e_{ij}' – девиатор тензора скоростей деформаций. Будем считать, что текущий объем пор/трещин в трансформирующейся горной породе составляет лишь малую часть общего объема, т.е. $V \approx V_s$, тогда из уравнения (4) приближенно получаем $\partial m/\partial t = (1-m_0)\partial\theta/\partial t$ и член $[-\dot{m}+(1-m)\dot{\theta}]$ можно записать в виде $(m_0-m)\dot{\theta}$. С другой стороны, для свободной энергии имеем зависимость $F_s = F(J_2',\theta)$, где J_2' – второй инвариант тензора деформаций, следовательно, $\dot{F}_s = (\partial F/\partial J_2')\varepsilon'_{ij}e'_{ij} + (\partial F/\partial\theta)\dot{\theta}$. Сравнивая правые части уравнений для свободной энергии, получим

$$T_{ij} = 2\frac{\partial F}{\partial J_2'}\varepsilon'_{ij}, -\sigma^f + [(\mu_s/\nu_s)-p](m_0-m) = \frac{\partial F}{\partial\theta}. \qquad (11)$$

Если задаться конкретным видом F для упругой твердой среды [6]

$$F = \frac{\lambda}{2}\theta^2 + \mu J_2' - \nu\theta\sqrt{J_2'},$$

где λ, μ, ν = const, то после простых вычислений получаем

$$-\sigma^f + [(\mu_s/\nu_s)-p](m_0-m) = \lambda\theta - \upsilon\sqrt{J_2'}, \quad T_{ij} = (2\mu - \frac{\nu\theta}{\sqrt{J_2'}})\varepsilon'_{ij}. \qquad (12)$$

Полученные уравнения играют роль реологических соотношений, позволяющих получить замкнутую систему уравнений для физико-химической механик природных пористых сред в ходе процесса изменения массы горных пород. Физический смысл полученных соотношений заключается в следующем. Соотношение Терцаги (5) жестко фиксирует величину эффективных напряжений, поскольку давление p в жидкости может быть обусловлено различными причинами, часто не связанными с дилатацией/усадкой массива горных пород. Но при изменении массы скелета идет процесс формирования новой пористости и, следовательно, дополнительной дилатации. Формирование новой дилатации должно приводить к появлению дополнительных эффективных напряжений, что и реализует член $[(\mu_s/\nu_s)-p](m_0-m)$.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. *Khramchenkov E.* Modeling of non-equilibrium mass-exchange processes in geo-systems / *E. Khramchenkov, M. Khramchenkov* // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2016. 86. pp. 1–4.

2. *Khramchenkov M.* A new approach to obtain rheological relations for saturated porous media / *Khramchenkov M., Khramchenkov E.* // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 72. 2014. pp. 49–53.

3. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика / М.: Недра. 1996.

4. *Charlez Ph. A.* Rock Mechanics. V. 1. Editions Technip. 1991.

5. *Костерин А.В.* Основные уравнения и вариационные методы расчета изотермической фильтрации / *А.В. Костерин*: Дис. … докт.физ.-мат.наук. Казань. 1988. 159 с.

6. *Ляховский В.А.* О поведении упругой среды с микронарушениями / *В.А. Ляховский, В.П. Мясников* // Физика Земли. 1984. № 10. С. 71–75.

УДК 556.34: 504.4: 551.21

Геофильтрационное и геомиграционное моделирование как инструмент оценки экологических рисков в вулканических регионах

Д.Р. Сулеева

ООО «ПроТехИнжиниринг», Санкт-Петербург, Россия
Diana.Suleeva@pte.eurochem.ru

В работе рассматривается применение численного геофильтрационного и геомиграционного моделирования для прогнозирования распространения опасных флюидов и оценки экологических рисков. На примере промышленной территории площадью 27.66 км² с использованием программного комплекса Visual MODFLOW Flex 7.0 построена 22-слойная гидрогеологическая модель, учитывающая многослойное строение и фильтрационные свойства водоносной системы. Продемонстрированы результаты калибровки модели по данным режимных наблюдений и выполнен прогноз миграции высокоминерализованных рассолов.Особое внимание уделено оценке эффективности пяти вариантов инженерной защиты подземных вод, среди которых комбинированный подход наилучшие результаты, значительно снизив разгрузку загрязненных вод в поверхностные водотоки. Обоснована универсальность разработанного методологического подхода и возможность его адаптации для решения задач экологической безопасности и прогнозирования миграции природных гидротермальных флюидов в районах активного вулканизма.

Groundwater Flow and Transport Modeling as a Tool for Environmental Risk Assessment in Volcanic Regions

Diana R. Suleeva

ProTechEngineering LLC, St. Petersburg, Russia

The paper discusses the application of numerical groundwater flow and solute transport modeling to predict the migration of hazardous fluids and assess environmental risks. Using a 27.66 km² industrial site as a case study, a 22-layer hydrogeological model was constructed in Visual MODFLOW Flex 7.0, incorporating the multi-layered structure and hydraulic properties of the aquifer system. The model calibration results based on monitoring data are presented, and a transport forecast for highly mineralized brines is performed. Special focus is given to evaluating the effectiveness of five engineering protection scenarios for groundwater, among which a combined approach demonstrated the best results, significantly reducing contaminated water discharge into surface streams. The study demonstrates the versatility of the developed methodological approach and its adaptability for ensuring environmental safety and predicting natural hydrothermal fluid migration in active volcanic areas.

Интенсивное промышленное освоение территорий сопровождается образованием техногенных источников загрязнения подземных вод, включая высокоминерализованные рассолы. Одновременно в вулканических регионах естественные гидротермальные системы формируют аналогичные по составу флюиды [1] с повышенной концентрацией хлоридов, сульфатов и тяжёлых металлов [2]. В обоих случаях возникает потребность в

прогнозировании миграции растворённых веществ и обосновании мер по минимизации экологических рисков.

В работе представлены результаты геофильтрационного и геомиграционного моделирования для территории с объектами хвостового хозяйства. Модель охватывает площадь 27.66 км², имеет пространственную дискретизацию 20×20 м и включает 22 расчётных слоя, отражающих многослойное строение водоносной системы: техногенные отложения (Кф=10 м/сут), четвертичные пески и суглинки (Кф=0.5–5 м/сут), пестроцветную толщу и терригенно-карбонатную толщу (Кф=0.5–1 м/сут). Расчёты выполнены в программном комплексе Visual MODFLOW Flex 7.0 (модули MODFLOW, MT3DMS) [3].

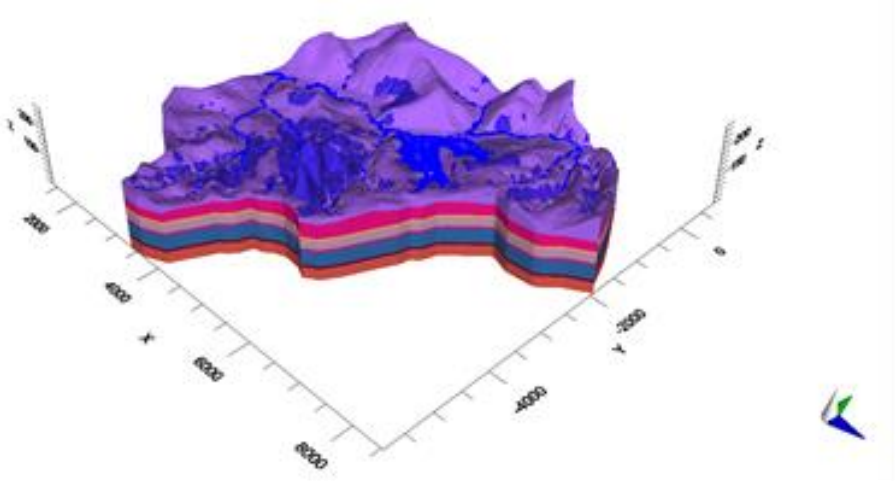


Рисунок 1 – Схематическая 3d-модель гидрогеологического пространства

Калибровка фильтрационной модели проведена по данным режимных наблюдений за расходами рек и дренажных систем. Ошибка по расходам рек составила 2% (фактический расход 11 150 м³/сут против модельного 10 961 м³/сут). В условиях нарушенного режима питание подземных вод осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков (43% притока) и подтока по границам третьего рода (49%). Основная разгрузка приходится на реки (71%) и дренажные системы (28%).

Для оценки миграции загрязняющих веществ решалась конвективно-дисперсионная задача [4] с дифференцированными значениями эффективной пористости: 0.14 для четвертичных отложений и 0.02 для трещиноватых пород. В качестве модельного загрязнителя задана концентрация 390 г/л хлоридов натрия и калия. Моделирование показало, что без защитных мероприятий фронт загрязнения достигает поверхностных водотоков в течение 5–10 лет.

Оценена эффективность пяти вариантов инженерной защиты подземных вод [5]. Наиболее эффективным признан комбинированный вариант «полная противофильтрационная завеса + дренаж», обеспечивающий снижение разгрузки загрязнённых вод в реки до 53.1% от исходного значения и увеличение доли перехвата дренажными системами до 46.9%. Такой подход позволяет не только ограничить распространение загрязнения, но и обеспечить управляемый отвод потенциально опасных флюидов.

Полученные результаты демонстрируют универсальность методов геофильтрационного и геомиграционного моделирования. Разработанная методология применима не только для оценки техногенного воздействия, но и для прогнозирования миграции природных загрязнителей в вулканических регионах. Учёт гидрогеологической неоднородности, трещиноватости пород и динамики подземных потоков позволяет адаптировать подход для решения задач экологической безопасности в районах активных вулканов и гидротермальных полей, где состав и поведение термальных флюидов сопоставимы с промышленными рассолами.

Список литературы

1. *Kalacheva E.* Volcano-hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: Geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur / *E. Kalacheva, Y. Taran, T. Kotenko et al.* // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2016. V. 310. P. 118–131.

2. *Гирина О.А.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / *О.А. Гирина, Е.А. Лупян, А.А. Сорокин и др.* // Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018. 192 с.

3. Visual MODFLOW Flex. User manual. Waterloo Hydrogeologic. 2015.

4. *Лукнер Л.* Моделирование миграции подземных вод / *Л. Лукнер, В.М. Шестаков* // М.: Недра, 1986. 484 с.

5. *Гольдберг В.М.* Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / *В.М. Гольдберг, Газда* С. // М.: Недра. 1984. 262 с.

РАЗДЕЛ V. МЕТОДЫ ПОИСКА, УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ, ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ

CHAPTER V. EXPLORATION METHODS, FORMATION CONDITIONS, AND EXPLOITATION OF COMPLEX-STRUCTURE GEOTHERMAL, HYDROMINERAL, AND HYDROCARBON FIELDS

УДК 553.98:556.814

Гидроминеральное сырье попутных вод нефтяных месторождений

М.С. Шипаева, С.А. Усманов, А.С. Федотова

Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия
mariasipaeva@gmail.com

В ходе исследования проведено детальное изучение химического состава подземных вод девонских и каменноугольных отложений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, проанализировано 587 проб воды из разных тектонических структур, среди которых 274 образца девонского возраста и 313 – каменноугольного: по ним изучен анионный и катионный состав, определено содержание микрокомпонентов, построены карты их распределения, проведена оценка потенциала извлечения ценных элементов: на погруженных участках (Серноводско-Абдуллинский авлакоген и Мелекесская впадина) и на СТС наблюдается повышенное содержание ценных компонентов, что связано с глубиной залегания пластовых вод и процессами геохимической метаморфизации рассолов. При оценке потенциала извлечения лития из рассолов учитывалось соотношение магния к литию, так как оно определяет выбор методов извлечения. Перспективным методом извлечения является применение сорбентов, селективных к ионам лития, с последующей десорбцией и концентрированием. Важным преимуществом использования попутно добываемых вод в качестве источника минерального сырья является низкая себестоимость продукта ввиду отсутствия затрат на добычу этих вод, поскольку они извлекаются на поверхность в процессе эксплуатации месторождений, и необходимость в строительстве дополнительных добывающих скважин или дорогостоящих горных разработок отсутствует.

Oilfield Produced Water as a Source of Valuable Mineral Resources

Maria S. Shipaeva, Sergey A. Usmanov, Anastasia S. Fedotova

Kazan Federal University, Kazan, Russia

A comprehensive hydrogeochemical study of formation waters from Devonian and Carboniferous reservoirs of the Volga–Ural petroleum province was conducted to assess their potential as a source of valuable elements. A total of 587 water samples from different tectonic zones were analyzed, including 274 Devonian and 313 Carboniferous samples. Major anion and cation compositions and trace-element concentrations were determined, spatial distribution maps were constructed, and the resource potential of the waters was evaluated. Elevated concentrations of valuable components were identified in structurally deeper areas, particularly within the Sernovodsko–Abdullinsky Aulacogen and the Melekess Depression, as well as in the North Tatar Arch. The observed enrichment is attributed to the greater burial depth of formation waters and the progressive hydrogeochemical evolution of highly mineralized brines. The magnesium-to-lithium ratio (Mg/Li) was considered in evaluating lithium recovery potential because it is a key parameter controlling the selection and efficiency of extraction technologies. Lithium-selective sorption followed by desorption and concentration is considered one of the most promising approaches for lithium recovery from these brines. The use of oilfield produced water as a source of valuable mineral resources offers an important economic advantage, as these fluids are already brought to the surface during routine field production. Consequently, no additional wells or capital-intensive mining operations are required solely to access the mineral-bearing fluids, potentially reducing the overall cost of valuable-element recovery.

Основная часть

Рассматриваемый регион тектонически разделен на 2 крупных поднятия – Северо-Татарский свод и Южно-Татарский свод, являющихся основными зонами скопления углеводородов. У Южно-Татарского свода выделяют 4 склона: юго-восточный склон является более погруженной структурой относительно сводовой части ЮТС – их разделяет прогиб. Отмечаются погруженные области – Мелекесская впадина и Серноводско-Абдуллинский авлакоген (рис. 1).

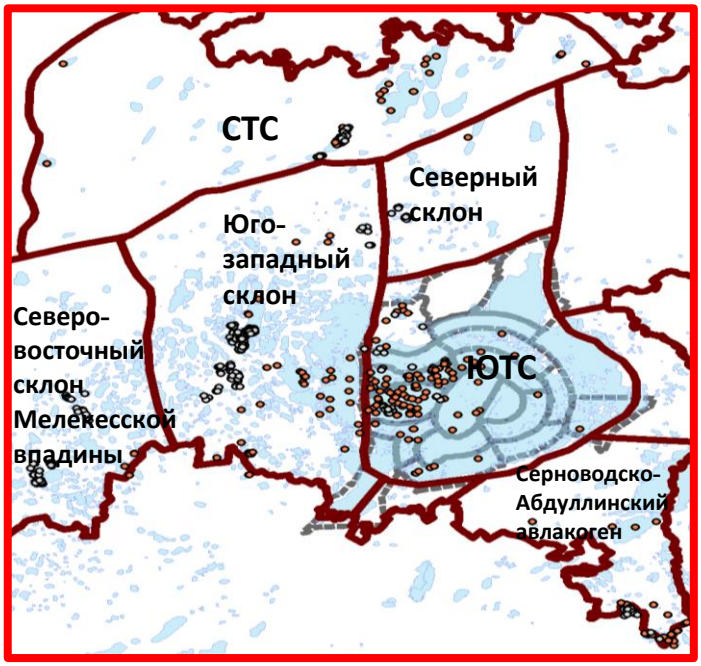


Рисунок 1 – Карта положения точек отбора проб (коричневый цвет – девонская ситема, серый – каменноугольная система)

Известно, что в рассолах региона содержатся высокие концентрации различных микрокомпонентов, включая литий, стронций, магний, марганец, рубидий и цезий. Несмотря на их значимость, детальный состав этих микрокомпонентов остается недостаточно изученным. Поэтому в данной работе проводится оценка их содержания в разных тектонических структурах на основе изучения 587 образцов пластовой воды, включая 274 образца, приуроченных к девонским отложениям, и 313 образцов с каменноугольных отложений.

Водоносные горизонты терригенного девона с глубиной залегания 1000–1200 метров, приурочены к песчано-алевролитовым пластам, разделенным глинистыми и глинисто-карбонатными водоупорами. Однако разделы между пластами не выдержаны, поэтому вся терригенная часть девона представляет собой единый гидрогеологический резервуар, в котором физико-химические свойства подземных вод схожи [1]. По своей приуроченности и происхождению подземные воды изучаемого региона представляют собой высококонцентрированные природные рассолы хлоридно-кальциевого типа, имеющие среднюю минерализацию 250 г/л, удельный вес 1.163–1.18 г/см^3.

Гидрогеохимические условия каменноугольных отложений с глубиной залегания от 600 до 800 метров многообразны. В отличие от пластовых вод девонских отложений для них характерно меньшее содержания кальция и магния и большее процентное содержание натрий-иона, наличие сульфатов. Анионный состав характеризуется преобладанием хлорид-иона.

Гидрогеохимические условия обеих систем типичны для зоны, характеризующейся весьма затруднённым водообменом. Согласно классификации В.А. Сулина, все образцы относятся к хлоридно-кальциевому типу, что указывает на глубинную природу происхождения воды.

По данным минерализации пластовых вод отмечается зональность: центральная часть ЮТС (Зона 4) и северная часть западного склона ЮТС (Зона 4.1) являются техногенно измененными: низкая минерализация пластовых вод (от 20 до 130 г/л) обусловлена закачкой сточных и пресных вод с начала разработки. Зона Северо-Татарского свода (Зона 3) и погруженных частей – авлакогена (Зона 2) и Мелекесской впадины (Зона 1), западного склона ЮТС – напротив, обладают природными характеристиками воды, свойственной девонскому объекту со средней минерализацией 250–270 г/л и могут быть рассмотрены как перспективные.

При оценке промышленных концентраций микроэлементов [2] для извлечения наиболее перспективным оказался стронций благодаря своему высокому содержанию, превышающему 500 ppm (ПДК) в основных тектонических структурах.

В результате анализа микрокомпонентного состава установлено наличие в изучаемых рассолах таких металлов, как литий, марганец, рубидий, стронций и цезий. Высокие концентрации лития в основном наблюдаются на сводах СТС (Зона 3), ЮТС (Зона 4) и в авлакогене (Зона 2), в то время как для Мелекесской впадины и юго-западного склона ЮТС характерны более низкие значения.

Среднее содержание лития в пластовых водах девонских отложений варьируется от 1.4 до 3.5 ppm в пределах тектонических элементов, при этом самые высокие концентрации были зафиксированы в образцах с Серноводско-Абдуллинского авлакогена и СТС (3.5 и 3.3 ppm соответственно). В каменноугольных водах медианная концентрация лития стабильно выше, чем в девонских. Наибольшая вариативность и максимальные концентрации наблюдаются в образцах каменноугольной системы Южно-Татарского свода, где содержание лития превышает 13 ppm.

Концентрация лития не увеличивается пропорционально ни концентрации магния, ни минерализации. Это может свидетельствовать о более интенсивном взаимодействии воды с горными породами, эволюции рассолов и возможном поступлении лития из терригенных минералов. Воды каменноугольного и девонского периодов образуют различные геохимические условия на момент отбора пробы, что связано с техногенным изменением рассолов девонской системы.

Извлечение лития, обусловленное его геохимическими свойствами как литофильного элемента с крупными ионами, родственного калию, рубидию и цезию, во многом зависит от соотношения магния и лития (Mg/Li) [3, 4]. Данное соотношение на рассматриваемом месторождении колеблется от 415 до 3960 (рис. 2). Следовательно, мембранные методы и концентрированное осаждение не подходят для извлечения лития. Перспективным решением является использование селективных сорбентов для ионов лития с последующей десорбцией и концентрацией или применение новых технологий [5, 6]. Наиболее перспективными объектами для извлечения лития и связанных с ним ценных элементов являются девонские отложения СТС, ЮТС и авлакоген, поскольку меньшие концентрации элемента в рассолах компенсируются большими объемами добываемой воды.

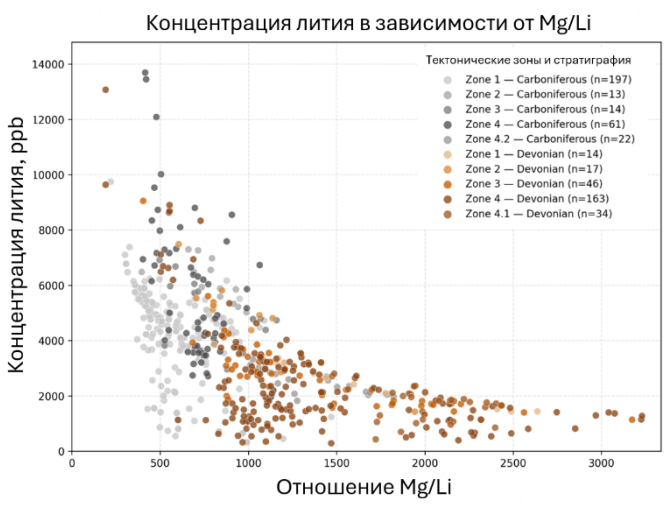


Рисунок 2 – Концентрация Li в зависимости от Mg/Li

Расчеты

Для оценки потенциальных объемов добычи полезного сырья производится расчет: используются данные по добыче воды каждой рассмотренной скважины в год и суммируются в соответствии с тектоническим элементом. Расчет производился по формуле:

$$Qi = Pi \cdot КИi, \quad (1)$$

где Qi – потенциальное количество извлечения каждого вида товарной продукции для каждого объекта, т/год для макроэлементов и кг/год для микроэлементов; Pi – годовое количество определяемых i-х компонентов, содержащихся в воде на каждом объекте, равное умножению дебита воды и средней концентрации компонента; КИi – коэффициент извлечения i-го промышленно ценного компонента (принимаем КИi = 1).

Общий объем воды, добываемой из выбранных скважин, составляет 849377 тонн в год. Исходя из концентрации данного элемента по каждой из зон, суммарная возможная добыча составляет 2.44 тонны в год (табл. 1). Наибольшее количество потенциально добываемых солей наблюдается на сводах – СТС в виду высокой минерализации и больших объемов добычи и ЮТС ввиду значительного количества изученных скважин. Кроме лития, по которому приводятся результаты расчетов, рассолы Южно-Татарского свода также обладают таким ценным сырьем как цезий (14 кг/год) и рубидий (603 кг/год). Рассолы Северо-Татарского свода в свою очередь позволяют потенциально добывать около 7.5 кг/год цезия и 347 кг рубидия. Среди получаемых продуктов – хлорид и оксид магния, хлорид натрия, карбонат лития, хлорид рубидия, карбонат стронция и другие.

Таблица 1. Расчет количества извлеченного лития из исследуемых рассолов

Зона	**Стратиграфическая приуроченность**	**Количество скважин**	**Добыча воды, т/год**	**Концентрация Li, ppb**	**Добыча Li, кг/год**
СТС	Девонские отложения	32	201227	2533.6	598.2
Серноводско-Абдуллинский авлакоген	Девонские отложения	21	123014	4526.1	535.3
ЮТС	Девонские отложения	76	302130	1784.8	447.4
Юго-западный склон ЮТС	Каменноугольные отложения	175	105451	4031.7	389.6
Северный склон ЮТС	Каменноугольные отложения	18	48678	2413.4	136.2
Серноводско-Абдуллинский авлакоген	Каменноугольные отложения	14	20006	6152.2	113.8
ЮТС	Каменноугольные отложения	22	18435	6996.0	105.3
Мелекесская впадина	Каменноугольные отложения	43	21646	4775.1	100.3
Юго-восточный склон ЮТС	Девонские отложения	23	8487	1465.6	12.2
СТС	Каменноугольные отложения	12	303	4891.0	1.5
	Суммарно	**436**	**849377**		**2439.8**

Выводы

Проанализирован состав пластовых рассолов различных тектонических структур с охватом около 1% скважин (с добычей воды около 0.85 млн тонн/год), задействованных в добыче углеводородов в изучаемом регионе. Все воды являются глубинными рассолами хлоркальциевого типа по классификации Сулина. В рассолах обнаружены микрокомпоненты, среди которых цезий, рубидий, стронций, литий и марганец. Перспективными зонами для извлечения лития отмечены СТС, ЮТС и Серноводско-Абдуллинский авлакоген. Рекомендуется продолжить изучение рассолов на обозначенных перспективных участках и разработать экономическое обоснование.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030)

Список литературы

1. *Абрамов В.Ю.* К геологическим характеристикам продуктивных пластов Западно-Лениногорской площади Ромашкинского месторождения / *В.Ю. Абрамов, А.С. Петров, П.Н. Власов* // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2015. № 2. С. 32–38.

2. Приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 02.01.2016 № 3-р (с изменениями от 19.04.2018) «Об утверждении методических рекомендаций по применению Классификации запасов и ресурсов нефти и горючих газов, утвержденных приказом Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 01.11.2013 № 477».

3. *Лю Г.* Новые подходы к извлечению лития из рассолов соленых озер: обзор / *Г. Лю, Ч. Чжао, А. Гахреман* // Гидрометаллургия 187. 2019. С. 81–100.

4. *Викстрём Х.* Доступность лития и перспективы его будущего производства / *Х. Викстрём, С. Давидссон и М. Хук* // Прикладная энергетика. 110. 2013. С. 252–266.

5. *Сяньжун Л.* Извлечение лития из рассолов с высоким соотношением Mg/Li методом кристаллизации-осаждения / *Лай Сяньжун, Сюн Пан, Чжун Хуэй.* // Гидрометаллургия, Т.192. 2020. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.

6. *Ликорреспондинг Ч.* Селективное удаление магния из богатого литием рассола для очистки лития методом синергетической экстракции растворителем с использованием β-дикетонов и Цианекса 923 / *Ч. Ликорреспондинг, К. Биннеманс* // AIChE J. 2020.

УДК 556.31

Гидроминеральные ресурсы восточного склона Фенноскандинавского щита

Г.С. Бородулина

Институт водных проблем Севера Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия
bor6805@yandex.ru

Дается краткая характеристика гидрогеологических условий и основных типов минеральных вод восточного склона Фенноскандинавского щита. Описываются месторождения: лечебно-питьевых минеральных железистых, бальнеологических радоновых средней концентрации, хлоридно-натриевых вод без специфических компонентов, дается характеристика условий формирования химического состава вод. Особое внимание уделено проблеме формирования хлоридных и гидрокарбонатных натриевых подземных вод на кристаллическом щите.

Hydromineral Resources of the Eastern Slope of the Fennoscandian Shield

Galina S. Borodulina

Institute Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, RA S, Petrozavodsk, Russia

This article provides a brief description of the hydrogeological conditions and main types of mineral groundwater on the eastern slope of the Fennoscandian Shield. Explored deposits are described: medicinal and drinking mineral iron waters, balneological radon groundwater, and chloride-sodium groundwater without specific components. It also describes the conditions under which the chemical composition of the waters is formed. Particular attention is given to the formation of chloride and sodium bicarbonate groundwater on the crystalline shield.

Карелия занимает центральную и наиболее обширную часть восточного склона Фенноскандинавского щита и на юго-востоке граничит с Русской платформой. На большей части территории формируются водоносные системы Балтийского гидрогеологического массива, и лишь южная и восточная части относятся к артезианским бассейнам. Массив сложен гранито-гнейсовыми комплексами архейского фундамента, на которых залегают вулканогенно-осадочные отложения протерозоя, перекрытые маломощным покровом ледниковых отложений. Гидрогеологические условия открытого кристаллического массива характеризуются отсутствием региональных водоупоров и повсеместным распространением

трещинных вод. Несмотря на общие и простые на первый взгляд гидрогеологические условия региона, неравномерное развитие трещиноватости кристаллических пород, пестрота литологического состава и невыдержанная мощность четвертичных отложений, создают разнообразные обстановки локализации месторождений и проявлений пресных и минеральных подземных вод. Преимущественное растпространение имеют гидрокарбонатные кальциево-магниевые воды, средняя величина минерализации 0.3 мг/л. Один из самых высоких показателей озерности региона с учетом Ладожского и Онежского озер исторически определил решение вопроса водоснабжения в пользу поверхностных вод. Доля подземных вод в общем балансе водоснабжения не превышает 6%, что является минимальным показателем в России [1].

Территория входит в Балтийскую область Восточно-Европейской провинции радоновых и железистых минеральных вод, формирующихся в коре выветривания и зонах разломов массивов пород архей-протерозоя. Третьим типом минеральных вод в Карелии, являются воды с минерализацией более 1 г/л без специфических компонентов и свойств, распространенные в платформенных отложениях, реже на кристаллическом щите. В настоящее время в республике действует один курорт – Марциальные воды, и одно медицинское учреждение, использующее радоновые воды для внекурортного обслуживания. В то же время в регионе имеются предпосылки для более широкого использования минеральных вод различных типов. Подземные воды преимущественно пресные, хотя встречаются солоноватые, от слабокислых до щелочных, по химическому типу – от наиболее широко распространенных гидрокарбонатных кальциево-магниевых до гидрокарбонатных натриевых, гидрокарбонатных магниевых, сульфатных и хлоридно-натриевых [2].

Месторождение железистых вод «Марциальные воды» находится в 50 км к северу от Петрозаводска, формируется в денудационно-тектонической долине оз. Габозеро (бассейн р. Шуя), в западной части Онежской палеопротерозойской структуры, сложенной вулканогенно-осадочными породами. Подземные воды месторождения приурочены к межморенным песчано-гравийным отложениям и верхней трещиноватой зоне шунгитсодержащих пиритизированных сланцев и долеритов. Естественные источники были обнаруженны при Петре I, который и явился в 1719 г. основателем первого в России курорта. В современном виде курорт действует с 1964 г. и использует в лечебно-питьевых целях подземные воды четырех самоизливающих скважин. Маломинерализованные (0.2–0.8 г/л) высокожелезистые (Fe^{2+} до 100 мг/л) сульфатные магниево-кальциевые воды в качестве характерного типа («марциальный») представлены в ГОСТах. Они представляют собой очень локальную и мало распространенную, но чрезвычайно характерную по своему генезису и химическому составу группу вод, которые формируются на небольших глубинах в зонах окисления пиритизированных пород [3].

Палеогеографические реконструкции предполагают, что сульфатная зона окисления сформировалась в период последнего оледенения, ее сохранности способствовали дефицит жидких осадков в морозных условиях и быстрое поднятие уровня подземных вод при потеплении климата. Состав воды формируется за счет смешения вод разного возраста – основной вклад дают современные воды инфильтрационного происхождения и небольшую долю все еще вносят реликтовые воды, сформировавшиеся при таянии мерзлоты. Присутствие реликтовой воды доказано наблюдениями за содержаниями дейтерия и кислорода-18 и других изотопных трассеров ($^{3}He/^{4}He$, $^{20}Ne/^{4}He$, $^{234}U/^{238}U$ и $\delta^{13}C$) [4, 5]. Архивные данные и современные наблюдения обнаруживают исчерпание реликтовой ледниковой компоненты растворителя и ее замену современными атмосферными водами. Определен возраст органогенных отложений в базальной части торфяной залежи (глубина 2.3 м) в районе скважин, и получена калиброванная радиоуглеродная дата 9640 ± 150 л. н., следовательно, керновый материал характеризует практически весь период голоцена. Вековые и межгодовые вариации в структуре составляющих компонентов подземного стока отражаются в близкой к обратной зависимости величин содержания железа и изотопного

отношения урана по разрезу залежи, что объясняется гидролизом железа (и фиксацией его в отложениях) в окислительных условиях и повышением миграционной способности урана [3].

Радоновые воды на территории Карелии имеют широкое распространение, что традиционно связывают с повышенным содержанием радиоактивных элементов в кристаллических породах. Высокие содержания радионуклидов приурочены к зонам гидротермального и вторичного изменения пород, которые наиболее интенсивно проявляются в местах тектонических нарушений, в зонах сопряжения интрузивного и метаморфического комплексов, в пределах зон дробления [1, 6]. Характерной особенностью радоновых вод является отчетливая связь с повышенным содержанием урано-радиевой минерализации в породах и степенью их трещиноватости. Примером такого типа месторождения является Кондокский участок радоновых вод (11 км г. Костомукша). Зона трещиноватости приурочена к надвигу позднеоргенной гранитной интрузии на осадочно-вулканогенные породы архея, и на участках дробления пород наблюдаются изменения гидротермального и метасоматического характера. Здесь при проведении поисково-оценочных работ в Костомукшском железорудном районе выявлены повышенная радиоактивность пород и родники с пресной слабокислой воды гидрокарбонатного (сульфатно-гидрокарбонатного) состава и высокой концентрацией радона (3300–4800 Бк/л). Оценены запасы месторождения, минеральная радоновая вода средней концентрации используется в бальнеологических целях в отделении радонотерапии городской больницы. Анализ геологических и гидрогеологических условий Кондокского участка показывает, что активные породы не имеют больших размеров, обеспечивающих достаточное время соприкосновение воды с породой, поэтому небольшая скорость движения подземных вод при прочих равных условиях становится важным фактором в формировании радоновых вод высокой концентрации. Известны и другие многочисленные источники радоновых вод в регионе, исследованиями ИВПС КарНЦ выявлены проявления средне- и высокорадоновых вод (до 9400 Бк/л), которые перспективны для дальнейших геологоразведочных работ [1, 2].

К типу минеральных лечебных вод с минерализацией более 1 мг/л и не содержащих биологически активные компоненты относится Олонецкое месторождение минеральных хлоридно-натриевых вод с минерализацией 4–8 г/л, приуроченное к нижней части нижнекотлинского горизонта Русской платформы. Разведанные запасы оценены в количестве 18.8 $м^3$/сут, в настоящее время месторождение не эксплуатируется. Соленые воды встречаются и в кристаллических породах щита, и проблема их формирования вызывает особый интерес. Считалось, что такое явление как соленые воды на щитах невозможно связать с какими-либо древними и современными морскими бассейнами и рассматривали альтернативные (автохтонные) процессы. Открытие в ходе бурения параметрической скважины в пределах Онежской структуры мощной (194 м) галитовой толщи в породах, относящихся к раннему докембрию Земли (ятулий), опровергло этот вывод [6]. Возможность поступления глубинных соленых вод в верхние части коры подтверждается существованием в пределах структуры естественного источника «Соляная яма», солоноватая вода которого (4 г/л) является результатом смешения с пресными приповерхностными водами, а первичная соленость вод, вероятно, значительно выше. Известная максимальная минерализация воды (7.2 г/л) и концентрация хлор-иона (3.8 г/л) в западной части Онежской структуры зафиксированы в скважине, вскрывшей напорную воду на глубине 100 м. Тот факт, что соседние скважины вскрыли пресные воды, свидетельствует о приуроченности разгрузки солоноватых вод к локальной тектонической зоне. Характерной особенностью хлоридных вод является высокое содержание гелия – на порядок выше, чем в водах других типов. Так, концентрация гелия в воде вышеупомянутой скважины составила 5.5×10^{-2} мл/л.

Подземные воды верхней зоны нижнепротерозойских пород щита являются инфильтрогенными в отличие от подземных вод платформы, которые с ростом минерализации обедняются натрием и значительно обогащаются кальцием и имеют признаки метаморфизованных вод. Изотопный состав хлоридных вод обеднен тяжелыми изотопами, «легче» среднемноголетнего состава атмосферных осадков (δ^2H = −84‰ и

$\delta^{18}O$ = –11.7‰) [7], но подземные воды платформенной окраины несколько отличаются от вод кристаллического массива: состав их более тяжелый, и в отдельных случаях наблюдается кислородный сдвиг (обогащение тяжелым кислородом за счет изотопного обмена с породами), что подтверждает процесс метаморфизма захороненных морских вод. Воды «Соляной ямы» характеризуются самым тяжелым изотопным составом (рис. 1).

Другой особенностью региона является появление в различных породах древнего щита щелочных гидрокарбонатных натриевых (содовых) подземных вод невысокой минерализации (до 0.5 г/л) и низкой жесткости, что связано с определенной стадией взаимодействия подземных вод с алюмосиликатами, приводящего к выпадению карбонатов и накоплению натрия. Иногда скважинами вскрываются гидрокарбонатные бессульфатные натриевые воды с высоким содержанием аммонийного азота, по комбинации признаков указывающих на процесс сульфатредукции и возможный источник углеводородного заражения геологического разреза. Последнее подтверждается исследованиями ученых Института геологии КарНЦ, которые выявили наличие аморфного углерода в магматических породах Заонежской свиты, который (углерод) образовался в результате миграции и осаждения из гидротермальных флюидов [8]. Изотопный состав свидетельствует о биогенном происхождении углерода, а вероятным его источником считается палеопротерозойский нефтяной резервуар Заонежской свиты (феномен Шуньга) [8].

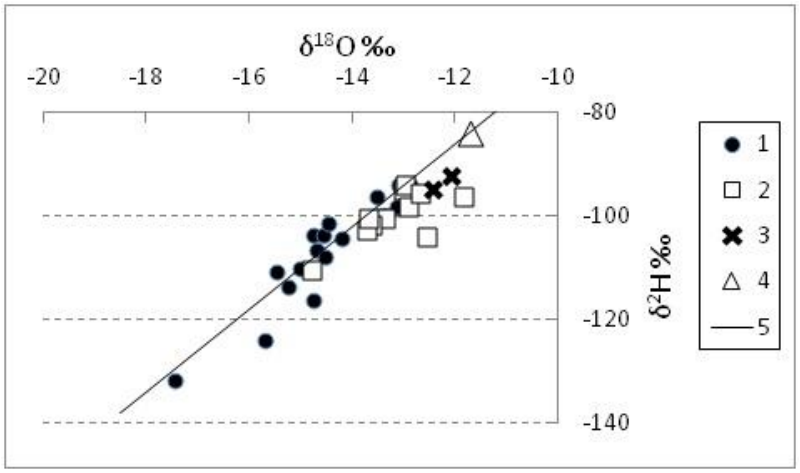


Рисунок 1 – Расположение точек изотопного состава хлоридных вод относительно локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ).

1 – воды кристаллического массива, 2 – воды платформенной окраины; 3 – «Соляная яма»; 4 – среднее атмосферных осадков, 5 – ЛЛМВ

Таким образом подземные воды восточного склона Фенноскандинавского щита отличаются разнообразием химического состава, и Республика Карелия имеет большие возможности для использования их как источника водоснабжения и в качестве минеральных.

Работа выполнена в рамках государственного задания FMEN-2021-0003.

Список литературы

1. Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / *Ред. Н.Н. Филатов, А.В. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. Регеранд.* Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2006. 263 с.

2. *Бородулина Г.С.* Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии / *Г.С. Бородулина, М.А. Левичев* // Горный журнал. 2019. № 3. С. 71–75.

3. *Бородулина Г.С.* Палеогеографические условия формирования сульфатных железистых вод на юго-восточном склоне Фенноскандинавского щита на примере «Марциальных вод» (Карелия) / *Г.С. Бородулина, И.В. Токарев, Т.С. Шелехова* // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2025. 70 (1). С. 52–69. DOI:10.21638/spbu07.2025.103.

4. *Бородулина Г.С.* Закономерности формирования железистых минеральных вод курорта «Марциальные воды» (Карелия) по благородным газам (3He/4He, 20Ne/4He) /

Г.С. Бородулина, И.Л. Каменский, В.И. Скиба, И.В.Токарев // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2020. 17. С. 61–65. DOI:10.31241/FNS.2020.17.011.

5. *Tokarev I.* Climatic causes of extreme disequilibrium of the uranium series (234U/238U) in groundwater of the North-West Russia / *I. Tokarev, E. Yakovlev, G. Borodulin et al.* // Hydrogeology Journal. 2025. 33(5). pp. 1–18. DOI: 10.1007/s10040-025-02925-z.

6. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / *Отв. ред. Л.В.Глушанин, Н.В.Шаров, В.В. Щипцов.* Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2011. 431 с.

7. *Borodulina G.* Isotope composition of natural water in the Lake Onega basin / *G. Borodulina, I. Tokarev, E. Yakovlev* // Water. 2023. 15. 1855. DOI: 10.3390/w15101855.

8. *Chazhengina S.* Amorphous carbonaceous material in Paleoproterozoic pillow lavas (Onega Basin, NW Russia): Origin, source and migration / *S. Chazhengina, A. Stepanova, V. Ustinova, S. Svetov* // Lithos. 460–461. 2023. 107373. DOI: 10.1016/j.lithos.2023.107373.

УДК 553.9: 551.21.034

Палеовулканы как аппараты массопереноса вещества и энергии для формирования нефтегазовых месторождений Надым-Пурской и Среднеобской НГО

А.С. Шарапов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
Западно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики, Тюмень, Россия
sharapov-as.2026@yandex.ru

В Надым-Пурской и Среднеобской нефтегазоносной области (НГО) закартированы палеовулканы как центрального, так и трещинного типа. Выявлена приуроченность многозалежных нефтегазовых месторождений к палеовулканам. Результаты исследования показывают, что палеовулканы на поствулканической стадии являлись источниками вещества и энергии для формирования нефтегазовых месторождений. Также, уделяется внимание гидротермальным растворам, которые способствуют увеличению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород-коллекторов и нефтегенерации. Тепловая энергия палеовулканов могла обеспечивать преобразование органического вещества нефтематеринских пород в нефть. А сейсмическая энергия обеспечила условия для первичной и вторичной миграции углеводородов (УВ).

Paleovulcanic Structures as Mass Carry of Matter and Energy Systems Controlling Petroleum Generation within the Nadym-Pur and Middle Ob Oil and Gas Region

Anatolii S. Sharapov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
West Siberian research institution of geology and geophysics, Tyumen, Russian Federation

Paleovulcanic structures of the Permian–Triassic age represents potentially significant factor in hydrocarbon accumulation within the Nadym-Pur and Middle Ob oil and gas region of Western Siberia. Results demonstrate that hydrocarbon accumulations are spatially associated with both fissure-type and central-type paleovolcanoes identified through gradient anomalous magnetic field mapping. All Bazhenov Formation anomalous section zones in the study area are confined to paleovolcanic structures, confirming their seismic activity as a primary trigger for Bazhenov Formation disruption. Elevated gas-to-oil ratios, gas condensate inflows, and high concentrations of hydrogen in well samples provide direct geochemical evidence of hydrothermal fluid activity within paleovolcanic zones.

Введение

Палеовулканические структуры пермско–триасового возраста представляют собой малоизученный, но потенциально важный фактор для формирования углеводородных залежей на территории Надым-Пурской и Среднеобской НГО Западной Сибири.

Изучение палеовулканов особенно важно для прогнозирования нефтегазоносности, так как они:

1. Являются сейсмически активными зонами, что подробно описано в ряде научных работ [1]. Эта активность создает сеть разломов, а следовательно, и трещин, повышающих ФЕС пород-коллекторов [2].

2. Палеовулканы являются источниками тепловой энергии [3]. Высокие температуры и давления – важный фактор для превращения органического вещества в нефть.

3. Сейсмичекая активность и тепловая энергия палеовулканов приводит к формированию высокоэнтальпийного флюида. И, как результат возникновение гидротермальных процессов, оказывающих влияние на ФЕС пород-коллекторов и процессы нефтегенерации.

Цель данной работы показать, что на территории Надым-Пурской и Среднеобской НГО имеются древние вулканические постройки, сыгравшие значимую роль в процессе нефтегенераци.

Материалы и методы исследования

Для написания статьи использованы следующие материалы: карта аномального магнитного поля (АМП) под редакцией Р.М. Антоновича в масштабе 1:50000; собраны контуры нефтегазоносности и зоны нарушенного залегания баженовской свиты (АРБ) на изучаемой территории; структурные карты отражающих горизонтов; просмотрены дела разведочных и поисковых скважин, из данных дел отобраны результаты испытаний и химические анализы пластового растворенного газа; изучены сейсмические данные. Для обработки материалов использованы следующие программы: для обработки карты АМП – «КОСКАД 3D»; для 3D визуализации – Adobe; ISOLINE для картопостроения.

Для выделения палеовулканов используется карта градиента аномального магнитного поля (АМП), отображенная в псевдорельефе. Данная карта позволяет эффективнее выделять палеовулканы. Также, установлено, что современные вулканы приурочены к магнитным аномалиям [4].

Основным методом исследования является сравнительный метод.

Результаты исследования и обсуждения

В пределах изучаемых палеовулканов наблюдается большое количество нефтегазовых залежей. Так, например, на рис. 1 изображен палеовулкан, являющийся палеовулканом фреатического типа, и расположенный в Надым-Пурской НГО вблизи г. Ноябрьска, и нефтегазовые залежи над ним, а также отображена зона АРБ. В пределах данного палеовулкана в осадочном чехле расположено более 40 нефтегазовых залежей (на рис. 1 отображены обобщенные контуры нефтегазоносности).

Сопоставление контуров нефтегазоносности с градиентными АМП показало приуроченость большого количества нефтегазоносных залежей к палеовулканам как трещинного типа, так и центрального типа.

В пределах изучаемых палеовулканов расположены скважины, давшие во время испытания газ, газоконденсат, приток нефти с газом, притоки воды с газом и скважины с гидратообразованием. Расположение данных скважин и их повышенный газовый фактор указывает на высокие температуры в пределах изучаемых палеовулканов. Так, как при более высоких температурах нефть начинает активно изменяться с образованием УВ газа [5].

Сопоставление зон нарушенного залегания баженовской свиты (АРБ) с палеовулканами, указывает на приуроченность всех зон АРБ к палеовулканам. Все зоны АРБ приурочены либо непосредственно к палеовулканам, либо располагаются в непосредственной близости к ним. В

научных работах [6] констатируется, что землетрясения являются наиболее вероятным фактором, запускающим процесс формирования АРБ.

По методу А.Л. Наумова [7] определены зоны неотектонического воздымания. Большая часть палеовулканов испытала неотектоническое воздымание, и в пределах данных палеовулканов расположены скважины, давшие во время испытания газ, газоконденсат, приток нефти с газом, приток воды с газом.

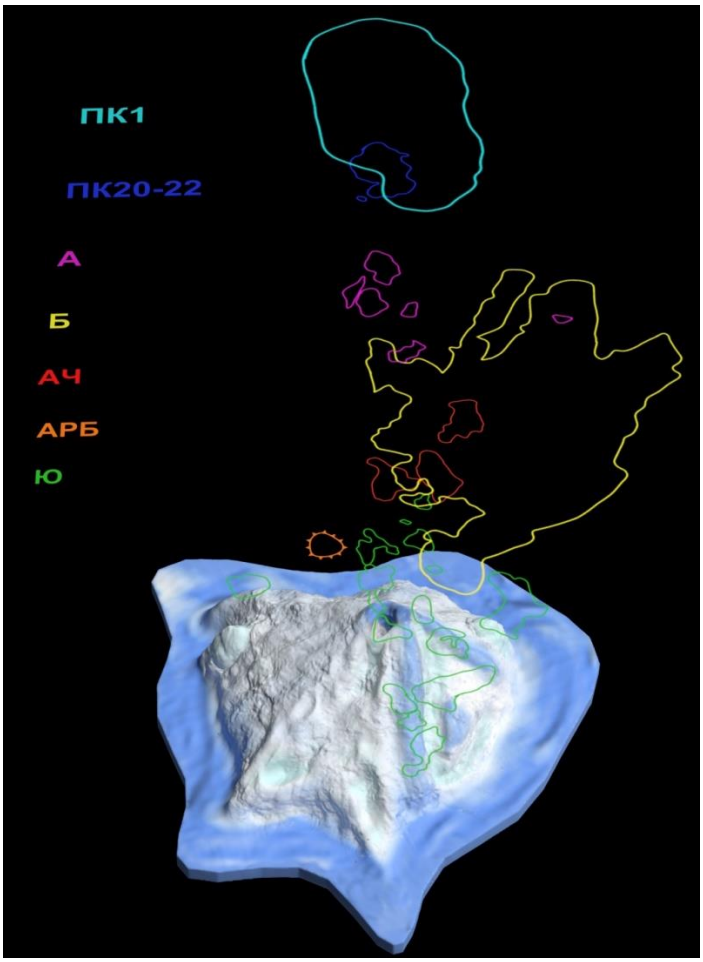


Рисунок 1 – Палеовулкан с отображением контуров нефтегазоносности и зоной АРБ

Изучение расположения скважин с отбором пробы газа (автором отбирались пробы газа с содержанием водорода (H_2)> 1 об. %) уверенно показывает приуроченность данных скважин к палеовулканам. Так, водород входит в состав гидротермальных флюидов [8], а следовательно высокое содержание водорода в пробах газа явно указывает на наличие гидротермальных процессов в пределах палеовулканов. Также в пределах некоторых палеовулканов наблюдается повышенное содержание углекислого газ ещё одного компонента гидротермальных флюидов.

Вывод

На основе комплексного исследования геолого-геофизических и геохимических данных установлено наличие и влияние палеовулканов, как центрального, так и трещинного типа на формирование нефтегазоносности на территории Надым-Пурской и Среднеобской НГО. Исследование показало, что палеовулканы – сейсмически активные области, которые испытывали тектоническую активность в различные периоды осадконакопления. Результаты анализа доказывают приуроченность повышенных температур к палеовулканам. Также, установлено, что в районах изучаемых палеовулканов наблюдается наличие гидротермальных флюидов.

Список литературы

1. *Соломатин А.В.* Исследование связи вулканической активности и сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона / *А.В. Соломатин* // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 61. DOI: 10.7868/S0203030614010052.

2. *Бембель С.Р.* Перспективы открытия и вовлечения в разработку продуктивных интервалов доюрского комплекса Западной Сибири / С.*Р. Бембель, Р.М. Бембель, Д.О. Карпов* // DOI: 10.31660/0445-0108-2024-5-11-22 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2024. № 5. С. 11–22.

3. *Уткин И.С.* Динамика роста и развития проточных магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов, их тепловые поля и накопленное ими подземное тепло / *И.С. Уткин, С.А. Федотов, И.Ф. Делемень, Л.И. Уткина* // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 11–29. URL: http://repo.kscnet.ru/id/eprint/1631.

4. Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулканического массива Архангельского (Курильская островная дуга) / *Ю.И. Блох, В.И. Бондаренко, А.С. Долгаль и др.* // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2019. № 4(44). С. 35–50. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-4-44-35-50.

5. *Прищепа О.М.* Термодинамическое моделирование как основа прогноза фазовых состояний углеводородных флюидов на больших и сверхбольших глубинах / *О.М. Прищепа, Д.С. Луцкий, С.Б. Киреев, Н.В. Синица* // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 815–832. EDN CWLSTC.

6. *Гришкевич В.Ф.* О следах раскола островов протобаженита на седиментационном палеосклоне / *В.Ф. Гришкевич, Н.Н. Гатина, С.С. Долматова и др.* // Литосфера. 2017. Т. 17. № 4. С. 48–61. DOI: 10.24930/1681–9004-2017-4-048-061.

7. *Наумов А.Л.* Региональные тектонические перестройки и газоносность Западной Сибири / *А.Л. Наумов, Т.М. Онищук, Н.П. Дядюк* // Геотектоника. 1983. № 5. С. 67–73.

8. *Зубков М.Ю.* Тектоногидротермальные процессы в юрских отложениях Западной Сибири / *М.Ю. Зубков* // Геология нефти и газа. 2017. № 1. С. 64–82.

УДК 504.06:550.822

Опыт и методика определения параметров глубоких водоносных горизонтов для оценки запасов промышленных подземных вод на юге Сибирской платформы

Ю.К. Ланкин[1], **А.Г. Вахромеев**[1,2], М.А. Данилова[2], А.И. Кураничева[1], С.А. Сверкунов[1,2]

[1]*Институт земной коры, Иркутск, Россия*
[2]*Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, Россия*
andrey_igp@mail.ru

Опираясь на опыт испытания гидрогеологических скважин на промышленные рассолы глубоких горизонтов осадочного чехла на юге Сибирской платформы, и анализируя данные выполненных ранее ОФР, авторы рассмотрели методологию опытно-фильтрационных работ на объектах с аномально высоким пластовым давлением (АВПД). Сделан анализ данных гидродинамических исследований скважин в рассолоносных межсолевых сложных карбонатных трещинных коллекторах. Выявлены причины отрицательных результатов освоения скважин в условиях вскрытых бурением рассолоносных АВПД-систем.

Experience and Methodology for Determining the Parameters of Deep Aquifers and Horizons to Assess the Reserves of Industrial Groundwater in the Southern Part of the Siberian Platform

Yuriy K. Lankin[1], **Andrey G. Vakhromeev** [1,2], Maria A. Danilova [2], Anna I. Kuranicheva[1], Sergey A. Sverkunov[1,2]

[1]*Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, Russia*
[2]*Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia*

Based on the experience of testing hydrogeological wells for industrial brines in deep horizons of the sedimentary cover in the south of the Siberian Platform, and by analyzing the data from previously conducted field tests, the authors examined the methodology of experimental filtration work at sites with abnormally high reservoir pressure (AHP). An analysis was carried out of the data from hydrodynamic studies of wells in brine-bearing inter-salt complex carbonate fractured reservoirs. The reasons for the negative results of well development in conditions where brine-bearing AHP systems were encountered during drilling were identified.

Сибирская платформа является крупнейшей гидроминеральной провинцией мира и характеризуется почти повсеместным распространением подземных промышленных рассолов, которые отличаются аномально высокими концентрациями редких элементов, щелочных металлов и минеральных солей. По качеству гидроминеральное сырье является уникальным для России, и не уступает разрабатываемым месторождениям зарубежных стран. Однако целевые исследования рассолоносных горизонтов в глубоких скважинах на углеводородное сырье, по существу, не проводятся. Одной из причин этого является высокая стоимость бурения, и, как следствие, жесткое ограничение в проведении дополнительных работ, не связанных с бурением.

В процессе поисковых и разведочных работ промышленные подземные воды (гидроминеральное сырье) на Юге Сибирской платформы вскрыты значительным количеством скважин в пределах карбонатно-галогенной формации нижнекембрийских отложений (карбонатно-галогенная гидрогеологическая формация). Эти отложения осложнены дислокациями соляной тектоники, и формированием локальных структурно-вещественных неоднородностей, которое вызвано разнонаправленными мощными тектоническими напряжениями осадочной толщи. При этом, кроме образования пликативных дислокаций соляной тектоники, за счет высоких напряжений происходило выдавливание рассолов в карбонатные межсолевые пласты сопровождавшееся природными гидроразрывами [1]. Этот процесс способствовал образованию обновленного трещинного

межсолевого карбонатного коллектора, вмещающего высоконапорные подземные воды (рассолы) в пределах локальных структур с аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД). Напоры их практически повсеместно на сотни и даже первые тысячи метров выше поверхности земли. Они являются аномальными по сравнению с напорами ниже залегающей терригенной гидрогеологической формации венда и рифея.

Подземные воды в осадочной толще платформы распространены в виде общих ресурсов, которые слагаются из статических, динамических и упругих запасов подземных вод [2–4]. Упругие запасы представляют собой объем напорных вод, высвобождающийся при вскрытии водоносного пласта и снижении пластового давления в нем при откачке (самоизливе) за счет объемного расширения воды и уменьшении порового пространства самого пласта. Методика проведения опытно-фильтрационных работ (ОФР) продуктивных водоносных горизонтов упругими запасами отработана недостаточно. В основу расчета гидрогеологических параметров заложена обработка данных достижения квазистационарного режима фильтрации к скважинам или восстановления уровня после испытаний, являющегося приближенным его аналогом.

В процессе поисково-оценочных буровых работ на углеводородное сырье при вскрытии рассолов с АВПД изредка фиксировались лишь кратковременные показатели с восстановлением давления. Полученные при этом гидрогеологические параметры являются весьма приближенными. Впервые специализированные испытания межсолевого глубокого продуктивного водоносного горизонта проводились на Иркутском, позже на Ангаро-Ленском месторождении промышленных подземных вод по скважине 3А Знаменской [1]. Позже проведены специализированные испытания еще четырех скважин, вскрывших глубокие горизонты. По некоторым из них во время ОФР получен квазистационарный режим фильтрации. Методика проведения испытаний глубоких горизонтов [2–4, 5, 6] отличается от ОФР, проводимых в скважинах, где приток воды обеспечен статическими и динамическими запасами. При выпусках подземных вод из скважин с АВПД весьма сложно выдержать постоянный дебит. В связи с этим разработана методика проведения выпусков в прерывистом режиме [5], когда за одинаковые промежутки времени предложено отбирать одинаковый объем воды (рис. 1).

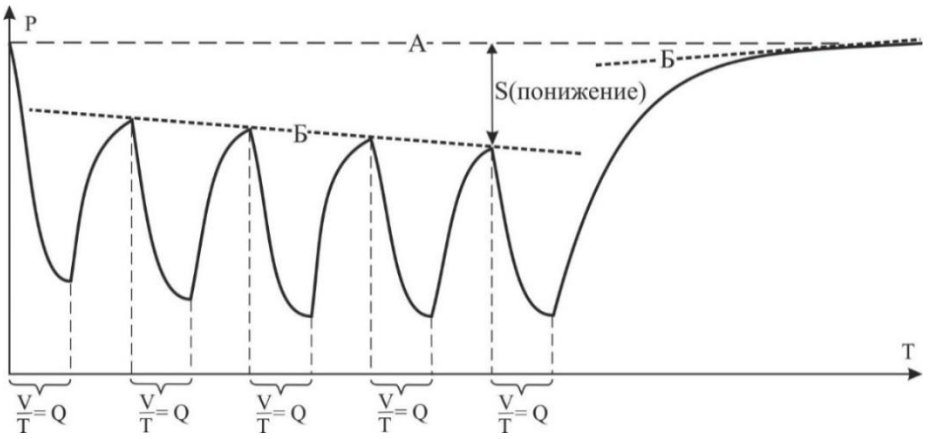


Рисунок 1 – Схема проведения ОФР в прерывистом режиме [5].

Величина не полного восстановления уровня подземных вод до статического при каждом цикле выпуска, показанного на графике линией (А), будет являться понижением (S) при постоянном дебите. Желательно получить квазистационарный режим снижения уровня, показанного линией (Б), приближенным аналогом к которому является линия при восстановлении уровня. На рис. 2 показан расчет коэффициента водопроводимости графоаналитическим методом Тейса-Джейкоба по результатам квазистационарного режима фильтрации, достигнутого при испытании одной из глубоких скважин в течение 6 суток.

По результатам ОФР в глубоких скважинах, вскрывших рассолы, проведенных на разных ступенях снижения давления (понижения уровня), в количестве от двух до пятнадцати, составлялись индикаторные графики зависимости изменения дебита и

коэффициента водопроводимости от понижения уровня. Установлено, что при снижении напора (увеличении понижения уровня) наблюдалось уменьшение дебита и коэффициента водопроводимости (рис. 3).

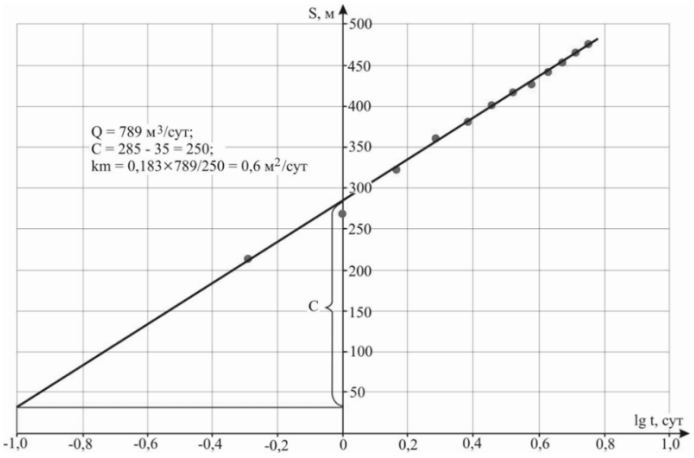


Рисунок 2 – Определение коэффициента водопроводимости графоаналитическим методом

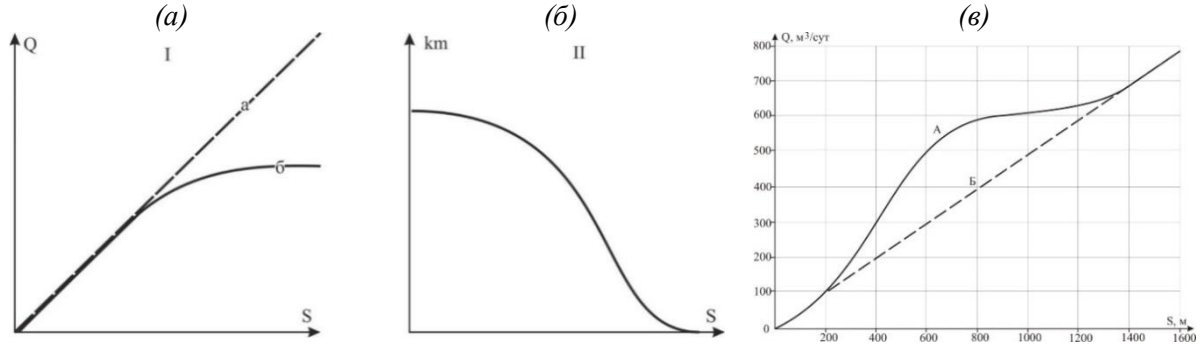


Рисунок 3 – а), б) Индикаторные графики – параметр дебит Q и km от величины понижения S; в) график зависимости дебита Q от понижения S по данным испытания скв. 3А Знаменская

На графике (I) показаны закономерности изменения дебита от понижения уровня воды в процессе ОФР. Прямая линия (а) отражает квазистационарный режим фильтрации подземных вод к скважине, который характерен для напорных вод динамических запасов в зоне интенсивного водообмена. Кривая линия (б) отражает ухудшение емкостных и фильтрационных свойств при эксплуатации скважиной упругих запасов глубоких горизонтов с трещинным типом коллектора.

На графике (II) отражено изменение водопроводимости продуктивного горизонта с упругими запасами рассолов. При увеличении понижения уменьшается водопроводимость продуктивного пласта [7]. Поэтому в процессе проведеня ОФР нельзя добиваться максимального понижения уровня, при котором обновленный трещинный коллектор может «закрыться», либо внедрять новые технологии [8]. Такой печальный опыт уже фиксировался в отдельных случаях. Проведение испытаний глубоких скважин должно проводиться на нескольких ступенях понижения, для того, чтобы определить его критическую величину [7], когда необратимо начнет уменьшаться водопроводимость продуктивного пласта.

Обводненность межсолевых карбонатных отложений карбонатно-галогенной гидрогеологоической формации неоднородна, является спорадической, вероятно связана с обновленным трещинным коллектором природных послойных гидроразрывов. Скважинами вскрываются отдельные зоны гидроразрывов, которые могут имень незначительную мощность. Однако они обычно распространены по всей межсолевой карбонатной толще в зависимости от распределения тектонических напряжений. Зоны гидроразрывов могут быть изолированы друг от друга или иметь гидравлическую связь. Оба этих случая наблюдались в процессе проведения ОФР. Например, при испытании скважины 3А при достижении

определенной величины понижения уровня, резко начал уменьшатся дебит, однако за счет перетекания этот процесс не получил дальнейшего развития (рис. 4).

По результатам интерпретации испытаний скважин, вскрывших глубокие горизонты установлено (см. рис. 4а), что рассолоносный горизонт может иметь коллектор с эффектом «двойной пористости» [9], что также отражается в уменьшении водопроводимости водовмещающих пород [1, 7] от увеличения понижения уровня (рис. 4б).

(а) *(б)*

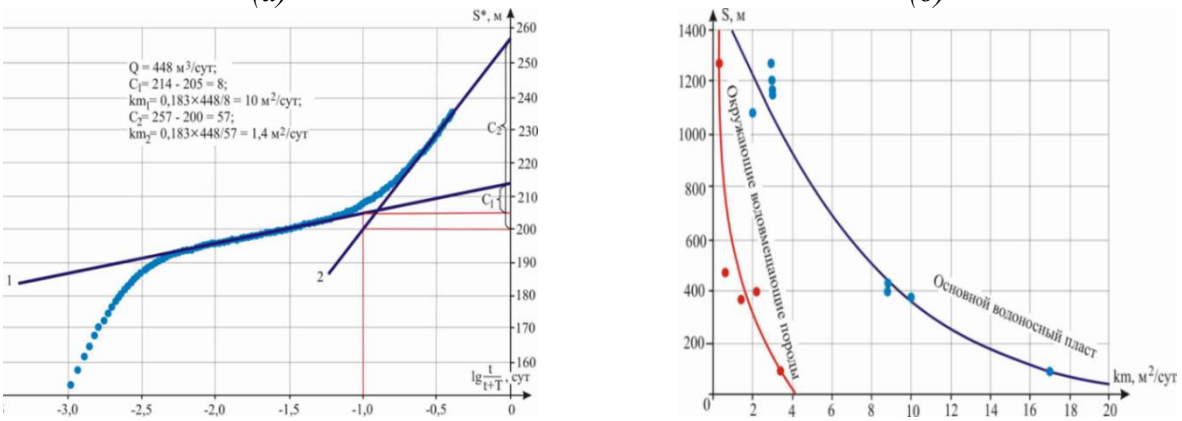


Рисунок – 4 а) Один из графиков, отражающий эффект «двойной пористости» продуктивного рассолоносного горизонта; б) график изменения водопроводимости от увеличения понижения уровня в условиях коллеторра с эффектом «двойной пористости»

Для подсчета запасов и прогнозных ресурсов рассолов по результатам испытания глубоких горизонтов нет необходимости разрабатывать новую методику. Подсчеты выполнялись с комбинацией использования традиционных методов: гидравлического; совместного гидравлического и гидродинамического; гидродинамического [1, 2, 4–6, 10].

Список литературы

1. *Вахромеев А.Г.* Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных кавернозно-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики: монография). Иркутск: ИРНИТУ. 2015. 247 с.

2. *Бондаренко С.С., Куликов Г.В.* Подземные промышленные воды. М.: Недра, 1984. 358 с.

3. *Боревский Б.В.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек / *Б.В. Боревский, В.Г. Самсонов, Л.С. Язвин* // М.: Недра, 1973. 304 с.

4. Опытно-фильтрационные исследования. Основные виды работ. Методы обработки / *Л.И. Аузина, Ю.К. Ланкин, А.Г. Вахромеев.* Учеб. Пособие. Иркутск: Изд-во ИрНИТУ. 2016. 120 с.

5. *Ланкин Ю.К.* Методика опытно-фильтрационных исследований (выпусков) из высоконапорных межсолевых продуктивных залежей промышленных литиеносных рассолов галогенно-карбонатной гидрогеологической формации Сибирской платформы / *Ю.К. Ланкин, А.Г. Вахромеев* // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3 (84). С. 315-320.

6. Методические рекомендации по оценке запасов промышленных подземных вод на Ковыктинском участке недр // *А.В. Корзун, А.Г. Вахромеев, О.Л. Павленко, и др.* ЕСОЭН, ООО «Газпром ВНИИГАЗ». 2023. 46 с.

7. *Белонин М.Д.* Аномально высокие пластовые давления. Происхождение, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов. / *М.Д. Белонин, В.И. Славин, Д.В. Чилингар* // СПб.: Недра, 2005. 324 с.

8. Патент РФ № 2755600. Экспрессный способ закрепления естественных и искусственных трещин в призабойной зоне продуктивного пласта в процессе первичного вскрытия бурением. // Опубл. 17.09.2021 Бюл. № 26.

9. *Голф-Рахт Т.Д.* Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов / пер. с англ. М.: Недра. 1986. 608 с.

10. *Бочевер Ф.М.* Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. 326 с.

УДК. 504.06:550.822

К проблемам ресурсной оценки и вовлечения в освоение промышленных рассолов артезианских бассейнов Сибирской платформы (на примере Преображенского месторождения, Непский свод)

М.А. Данилова[1,2], **А.Г. Вахромеев**[1,2,3], А.В. Левин[1], С.К. Квачко[1], И.А. Губин[1], А.В. Кирюхин[4], А.В. Сергеева[4], А.П. Горохов[1], А.В. Корзун[1,5]

[1]ООО «РН-ГИР», Красноярск, Россия
mart16@mail.ru, https:/orcid.org/
[2]ФБГОУ ИРНИТУ, Сибирская школа геонаук, Иркутск, Россия
[3]ФБГУН Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия
[4]Институт вулканологии и сейсмологии, Петропавловск-Камчатский, Россия
[5]Московский государственный университет, Москва, Россия

Крупнейшей редкометальной (K, Li, Rb, Cz) металлогенической провинцией мира является Сибирская платформа (СП). Здесь обнаружены все главные типы литиеносного сырья – промышленные редкометальные рассолы, лимнические глинистые толщи по вулканическим породам, рудные минералы лития (сподумен, петалит, цинвальдит) в изверженных массивах горно-складчатого обрамления кратона. Основная проблема ресурсной оценки и вовлечения в освоение крупных месторождений промышленных редкометальных рассолов артезианских бассейнов на Сибирской платформе – не до конца понятная закономерность распределения зон с разными, с высокими и с низкими фильтрационно-емкостными свойствами в межсолевых карбонатных резервуарах. Концентрации лития, рубидия, цезия, стронция, брома в рассолах превышают минимально промышленные в несколько раз, но только в сочетании с высокими дебитами могут рассматриваться как экономически рентабельные и перспективные для разработки объекты. Понимание модели формирования месторождений, определение основных факторов, влияющих на трещиноватость и кавернозность вмещающих пород, вплоть до карстовых проявлений, дает возможность прогноза поиска месторождений промышленных вод.

On the Issues of Resource Assessment and the Involvement of Industrial Brines from Artesian Basins of the Siberian Platform in Development (Using the Preobrazhenskoye Field and the Nepsky Arch as an Example)

Maria A. Danilova[1,2], **Andrey G. Vakhromeev**[1], Aleksey V. Levin[1], Svetlana K. Kvachko[1], Igor A. Gubin[1], Aleksey V. Kiryukhin[3], Anastasia V. Sergeeva[3], Alexander P. Gorokhov[1], Anna V. Korzun[1,4]

[1]OOO RN-GIR, Krasnoyarsk, Russia
mart16@mail.ru, https://orcid.org/
[2]FSEI Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Irkutsk, Russia
[3]Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, Russia
[4]Institute of Volcanology and Seismology, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
[5] Moscow State University, Moscow, Russia.

The Siberian Platform (SP) is the largest rare-metal (K, Li, Rb, Cz) metallogenic province in the world. All the main types of lithium-bearing raw materials have been found here – industrial rare-metal brines, lacustrine clay sequences overlying volcanic rocks, and lithium ore minerals (spodumene, petalite, zinvaldite) in the igneous massifs of the mountain-folded margin of the craton.The main problem in resource assessment and in involving large deposits of industrial rare-metal brines from artesian basins on the Siberian Platform in development is the not fully understood pattern of distribution of zones with different, high and low, filtration and storage properties in intersalt carbonate reservoirs. The concentrations of lithium, rubidium, cesium, strontium, and bromine in the brines exceed the minimum industrial levels by several times, but only when combined with high flow rates can they be considered economically viable and promising for development. Understanding the model of deposit formation, identifying the main factors influencing the fracturing and cavernous nature of the host rocks – up to karst manifestations – makes it possible to predict the location of industrial water deposits.

Введение

Актуальность работы связана с дефицитом собственного стратегического сырья в России – карбоната лития, более 90% которого сейчас является импортным. Установлено, что промышленные рассолы с самыми высокими концентрациями микроэлементов на Сибирской платформе приурочены к межсолевым галогенно-карбонатным горизонтам нижнего кембрия: усольская (пласт Б1), бельская (пласты А4, А6) и булайская (пласт А3) свиты, что делает эти объекты наиболее перспективными для извлечения из них лития, брома, стронция, рубидия и других элементов с получением целой линейки товарных продуктов.

Причины формирования сложного фильтрационного поля и аномально высоких концентраций редких элементов в рассолах средней части разреза СП до сих пор являются дискуссионными. Авторами статьи принимается гипотеза о многостадийном обогащении седиментационных рассолов межсолевых горизонтов микроэлементами, из различных источников в различные этапы геологической истории территории [1].

По опыту предприятий ПАО «НК «Роснефть» основными проблемами для ресурсной оценки и скважинной добычи промышленных рассолов являются:

1. Условно локализованный, неравномерно распределенный характер фильтрационного поля с аномальными ФЕС. По региональным данным бурения на нефть и газ карбонатные резервуары характеризуются низкими значениями пористости, проницаемости, высокой степенью засолоненности. Установлено, что зоны улучшенных ФЕС, АВПД сопряжены с гидродинамически напряженными условиями, вторичными преобразования коллектора, наложенной трещиноватостью, кавернозностью. Прогноз этих зон является сложной и важной задачей при составлении общей геолого-гидрогеологической концепции формирования месторождений рассолов.

2. Невыдержанный характер концентраций микроэлементов как по площади, так и в разрезе вероятно связан с наличием различных источников поступления вещества в пределах Сибирской платформы, многостадийностью их поступления, неравномерностью протекавших физико-химических процессов при различных температурах и давлениях [1]. Участки с максимальными концентрациями элементов в рассолах вероятно сформированы при сочетании нескольких источников обогащения на территории одной лагуны, «отшнурованного» палеобассейна. В докладе рассмотрена концепция формирования перспективного месторождения промышленных вод в карбонатных межсолевых отложениях усольской свиты (пласт Б1) на Преображенском участке ПАО «НК «Роснефть».

Результаты исследований и их обсуждение

В общей концепции формирования рассолов предполагаются следующие этапы и источники поступления микроэлементов в рассолы галогенно-карбонатной формации [2] Сибирской платформы:

1. На этапе существования кембрийского моря – концентрирование элементов в результате повышения солености в закрытых лагунах [2–4] до стадии эвтоники. Максимальные концентрации лития могли достигать 50 мг/л.

2. При извержении подводных и наземных кембрийских вулканов – привнос мантийных элементов с пеплами, и далее снос подводными течениями от очагов вулканической деятельности с глинистым материалом с формированием ореолов рассеивания [5]. В результате происходит накопление лития в пепловых туфах, их преобразование на дальнейших этапах в литиевые глины в кальдерах вулканов. На данном этапе глины являются сорбентом, и далее – источником лития для хлоридных рассолов, обеспечивая процесс обогащения по модели «вода-порода».

3. Длительный этап метаморфизма рассолов в закрытой гидродинамической системе при взаимодействии с вмещающими породами (карбонаты, гипс-ангидритовые толщи, глинистые минералы выветривания вулканических отложений, соли). Важно отметить, что несколько этажей мощных соляных пластов, сформированных в усольское, бельское, булайское и ангарское время обеспечили изолированность многопластовой карбонатной

системы резервуаров от внедрения водных растворов сверху более чем на 500 млн. лет, что подтверждается уникальным изотопным составом рассолов всех межсолевых объектов, не испытавших влияния атмогенных вод. Таким образом, трансформации состава рассолов межсолевых резервуаров могли происходить либо внутри самой системы, либо при влиянии снизу (условно мантийные, магматогенные эманации).

4. Этап геодинамической и тектоно-магматической активности, во время которого происходило масштабное внедрение траппов в пермо-триасовое время: в межсолевые горизонты привел к локальным нарушениям целостности и закрытости системы. Произошло повышение температуры пород при внедрении огромных масс раскаленной магмы, был запущен процесс формирования пародоминирующих систем: кипения рассолов, с достижением закритических температур парогазовой фазы, и появление в системе сверхкритических флюидов с аномальными свойствами, новые типы взаимодействия с карбонатами и солями, не протекавшие ранее [2]. При насыщении магмы водой – появление летучих компонентов, микроэлементов, трансформация как макро- так и микрокомпонентного состава рассолов. Трапповые магмы оказали не только физическое, но химическое воздействие на рассолы и вмещающие вулканогенно-осадочные породы.

5. На посттрапповом этапе при снижении температуры замедлялась циркуляция гидротерм по зонам разуплотнения (через трубки взрыва, по путям авто-ГРП внедрения трапповых силлов [1, 2]. Гидротермальные потоки привносили различные типы оруденения с формированием железорудных, золоторудных, медно-никелевых и др. месторождений.

На примере скважин лицензионных участков ПАО «НК «Роснефть» по результатам изучения данных ГИС было выявлено, что пласты А4 и А6, Б1 представляют собой кальцит-доломитовые разности, осложненные локальным наличием интервалов окремнения и ангидритизации. Структура емкостного пространства характеризуется засолонением и наличием невытесняемого органического вещества (преимущественно, залечивающего трещины). Пласты четко определяются в разрезах скважин, имеют региональное распространение и выдержанные параметры в пределах всей южной части платформы. Фильтрационные параметры изучаемых объектов, рассчитанные по результатам интерпретации данных ГИС: коэффициент эффективной проницаемости рассолов, в среднем, варьирует в диапазоне от 0.3 до 10 мД. Разработанная петрофизическая модель показывает, что в некоторых зонах только 2–4% пустотного пространства занято подвижным рассолом (динамическая емкость), остальная часть заполнена неподвижными флюидами: остаточными нефтью, битумом и рассолом. Подвижная часть рассолов в глубоких (более 900 м) горизонтах представлена упругими запасами. Начальные дебиты скважин фиксируются на уровне 10–70 $м^3$/сут.

В рамках гипотезы о значимом воздействии масштабно проявленного траппового магматизма на изменение пород и составов рассолов [1, 2], зоны с улучшенными ФЕС должны фиксироваться в областях влияния магмы мантийных силлов, но при условии наложения других факторов: геохимических (гидротермальных), палеогеографических и структурно-тектонических. В апикальной области под давлением внедряющегося потока магмы, кипения рассолов на фронте внедрения и увеличения давления, начиналось латеральное движение парогазового фронта в область более низких значений давления (рис. 1). Движение парожидкостной фазы (в жидком и субкритическом состоянии) происходило при наличии зон разуплотнения (тектонической и кавернозной трещиноватости), либо при формировании новых зон трещиноватости за счет авто-ГРП при повышении давления в системе сверх критического [2]. Удаление из системы избытков пара, газа и продуктов реакции приводило к увеличению пустотного пространства, где локализована залежь промышленных рассолов за счет процессов выщелачивания, глубинного карстования, доломитизации.

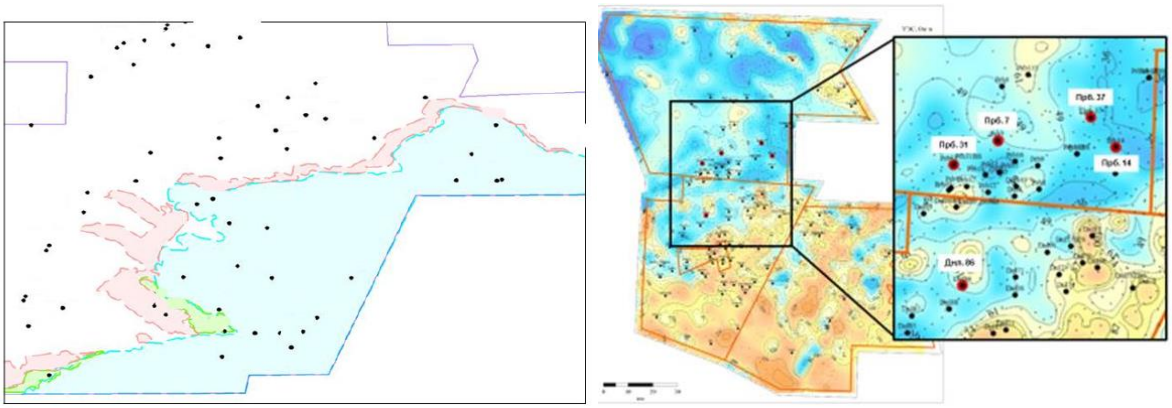


Рисунок 1 – Прогнозная схема: а) апикальной части траппового тела Усольского силла и от нее северо-западнее − б) контуров одной из залежей месторождения промышленных рассолов

Снижение энергии перетоков – направленной разгрузки на некотором удалении от траппа с течением времени привело к остыванию системы, замедлению всех процессов, выпадению легкорастворимых солей в пустотном пространстве карбонатных пород с полным его залечиванием и формированием слабопроницаемых границ, и наконец – к «запечатыванию» залежей. Конфигурация и размеры зон разуплотнения тектонической, карстовой природы вероятно предопределены интенсивностью и длительностью влияния фронта парогидротермального потока на вмещающие породы.

Заключение

Авторами доклада выполнено комплексирование различных методов исследований с целью уточнения граничных условий месторождения промышленных рассолов. Так, по результатам интерпретации данных сейсморазведочных работ 3D с применением атрибутного анализа и скважинным геопромысловым данным закартировано трапповое тело. Совмещение с картой разломов позволило определить предположительные направления палеодвижения парогазового фронта от силла, а по результатам интерпретации данных электроразведочных работ (ЗСБ), определено граничное условие сопротивления, соответствующее зоне максимального рассольного насыщения (см. рис. 1). В зонах пониженных сопротивлений, сопоставляемых с путями прорыва и палеперетоков парогазового флюида, отмечаются более высокие дебиты откачек, чем за их пределами.

Список литературы

1. *Данилова М.А.* Общие магматогенно-гидротермальные эвапоритовые циклы обогащения литием подземных вод древних и современных тектонически активных регионов. / *М.А. Данилова, А.Г. Вахромеев, А.П. Горохов и др.* // Мат-лы Всеросс. Научн. Конф. «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2024). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2024. 111 с. С. 108–111.

2. *Vakhromeev* A.G. Likely Sources of Lithium Mineralization in Intersalt Deposits and a Hydrogeological Model for the Angara--Lena Deposit of Commercial Lithium-Bearing Brine in the Siberian Platform / *A.G. Vakhromeev, M.A. Danilova, E.V. Demidova et al.* // Journal of Volcanology and Seismology, 2026, Vol. 20, No. 2, pp. 100–113. © Pleiades Publishing, Ltd., 2026

3. *Пиннекер Е.В.* Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука. 1966. 322 с.

4. *Мельников Н.В.* Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (Стратиграфия, история развития). Новосибирск: СО РАН. 2009. 148 с.

5. *Tyumentseva M.I.* New genetic type of lithium mineralization / *M.I. Tyumentseva, N.I. Akulov, A.I. Melnikov* // Solid Earth Sciences. 2024. V. 9. I. 3. 100194.

УДК 553.777

Проблематика целевых ГРР на промышленные рассолы на примере Ковыктинского месторождения (Ангаро-Ленский кластер)

И.А. Тиханович[1], А.Г. Вахромеев[2,3], Р.В. Горохов[1], С.А. Сверкунов[2,3], Ю.К. Ланкин[2], А.А. Малышев[1], Н.В. Мисюркеева[2], А.И. Ильин[2]

[1]*Газпром-Инвест, ПАО «ГАЗПРОМ», г. Санкт-Петербург, Россия*
itihanovich@invest.gazprom.ru
[2]*Институт земной коры, Иркутск, Россия*
[3]*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

Проанализирован опыт ГРР на промышленные литиеносные воды-рассолы глубоких горизонтов одного из месторождений ПАО «Газпром» на юге Сибирской платформы. Геологическая модель объекта ГРР и последующей оценки – крупная надвиговая пластина – аллохтон, размеры которой превышают 2000 км^2. На этапе ГРР решен комплекс задач изучения сложных карбонатных коллекторов, оценки гидродинамических параметров продуктивных трещинных зон, гидрогеохимического опробования, дана оценка ресурсной базы промышленных вод и лития.

The Challenges of Targeted Geological Exploration for Industrial Brines, Using the Kovykta Deposit (Angaro-Lena Cluster) as an Example

Igor A. Tikhanovich[1], Andrey G. Vakhromeev[2,3], Roman S. Gorokhov[1], Sergey A. Sverkunov[2,3], Yuriy K. Lankin[2], Artem A. Malyshev[1], Natalya V. Misyurkeeva[2], Anton I. Ilyin[2]

[1]*Gazprom-Invest, GAZPROM PJSC, St. Petersburg, Russia*
[2]*Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, Russia*
[3]*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

The experience of geological exploration for industrial lithium-bearing brines in deep horizons of one of the fields of PJSC GAZPROM in the south of the Siberian Platform has been analysed. The geological model of the exploration target and subsequent assessment is a large thrust plate – allochthonous massif, the dimensions of which exceed 2000 km^2. At the stage of geological exploration, a set of tasks was solved: studying complex carbonate reservoirs, assessing the hydrodynamic parameters of productive fracture zones, conducting hydrogeochemical sampling, and assessing the resource base of industrial waters and lithium.

Ковыктинское газоконденсатное месторождение (ГКМ) является уникальным объектом не только по запасам углеводородного сырья, но и по ресурсам концентрированных хлоридных кальциевых рассолов, содержащих промышленно значимые концентрации лития и других ценных компонентов. В рассолах месторождения содержится не только литий в высоких промышленно значимых концентрациях, но и такие элементы, как стронций, кальций, магний, рубидий и бром. Соединения лития и брома в подавляющем большинстве импортируются из-за рубежа, что создает угрозу сырьевой независимости РФ. В условиях растущего мирового спроса на литий освоение отечественной сырьевой базы лития в промышленных водах имеет особую актуальность, но сопряжено с решением ряда сложных геологических и технологических задач.

Для обоснованной оценки ресурсов лития и других элементов необходим широкий комплекс исследований. Целевое назначение ГРР – геологическое изучение природных резервуаров, закономерностей размещения, гидродинамических особенностей и граничных условий залежей литийсодержащих рассолов, обоснование методологии опытно-фильтрационных работ в пробуренных скважинах, расчет гидрогеологических параметров продуктивных горизонтов и оценка ресурсов промышленных рассолов и лития в карбонатно-галогенных отложениях нижнего кембрия Ковыктинского ГКМ. Важнейшая составная часть ГРР – изучение технологичности переработки сырья.

Модель продуктивного фильтрационного поля, в пределах которого получены и исследованы на продуктивность приточные объекты крайне сложна. На сегодня установлена базовая геологическая особенность строения галогенно-карбонатной гидрогеологической формации осадочного чехла, которая рассматривается как многослойная анизотропно-проницаемая толща. Гидропроводность трещинных систем по латерали, по напластованию на порядки превышает таковую по вертикали, благодаря соленосным экранам. Очевидно, кембрийские соли обеспечили сохранность залежей флюидов – УВ и рассолов, в какое бы геологическое время не происходила миграция. Литиевый лицензионный участок ограничен дислокациями складчато-надвиговой соляной тектоники. Геологическая модель объекта ГРР и последующей оценки ресурсов – крупная надвиговая пластина – аллохтон (рис. 1), размеры которой превышают 2000 км^2 [1, 2, 3].

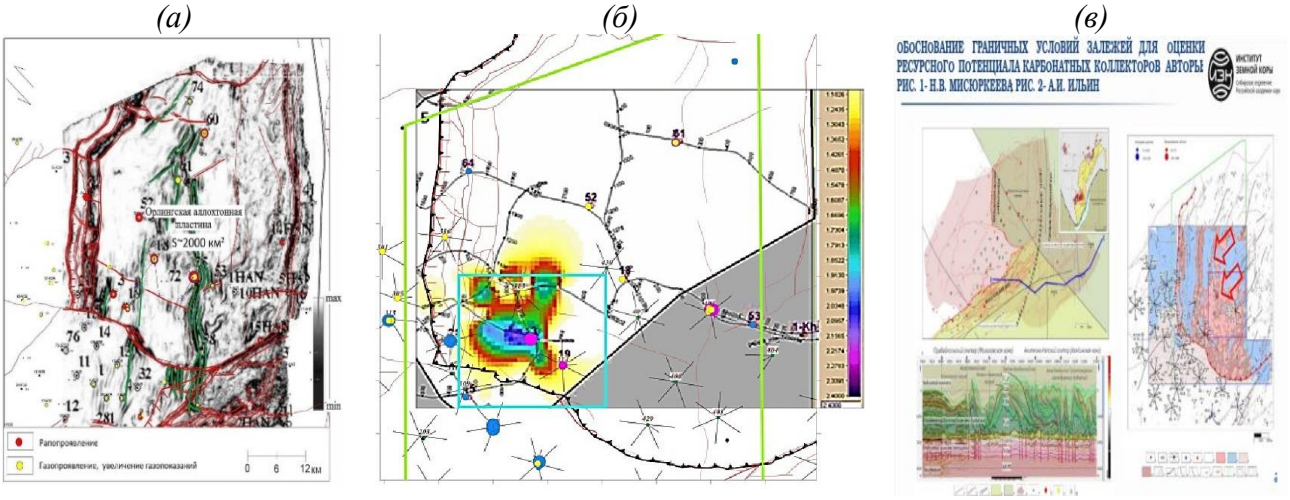


Рисунок 1 – Структурные элементы гигантской Орлингской надвиговой пластины а) на фрагменте карты когерентности волнового поля по данным 3Д СРР; б) по данным СРР-CSD; в) по данным 3Д-СРР. Ковыктинская площадь. (Н.В. Мисюркеева, А.И. Ильин, А.Г. Вахромеев)

Выявлены сложные горно-геологические условия бурения и крепления скважин (АВПД и аномально высокие, до 8000 м^3/сут дебиты продуктивных пластов. Предельная, (более 700 г/л) минерализация рассолов не имеют аналогов в мировой практике, требуют совершенствования буровых технологий, методологии испытания и скважинной добычи сырья [2, 4–6].

Реализованная в 2022-2026 гг ПАО «Газпром» целевая Программа ГРР впервые позволила наиболее полно охарактеризовать продуктивные рассолоносные объекты на юге Ангаро-Ленского артезианского бассейна: в галогенно-карбонатной гидрогеологической формации раннего кембрия в двух специальных гидрогеологических скважинах испытано 5 объектов – высоконапорных рассолопродуктивных резервуаров. Пока в обработку использованы данные по четырем из них. Биркинский горизонт и низы нижнебельской подсвиты. Притоки рассолов получены в девяти скважинах, испытаны летом, и будут оценены позже. Далеко не каждая кривая восстановления давления выхода на режим поддается интерпретации. Поэтому работа с первичными данными кривых забойных давлений должна быть реализована в дальнейшем в «on-line» – режиме. Отметим, что одновременная запись кривых выхода на режим (КВД) забойными манометрами и комплексным геофизическим прибором на кабеле – эффективное решение к оптимизации ОФР.

В процессе ОФР исполнителями наработан важный опыт выбора режимов (P, Q) исследований, контроль T потока, а также выбора временных интервалов между каждой кривой в прерывистом режиме. Выработаны алгоритмы профилактики зарастания лифтовых труб, устьевого оборудования и экспериментально проверить варианты на практике. Один из важнейших результатов внедрения в производственный цикл ГРР методологии проведения ОФР – запуск и исследование продуктивной рассолоносной зоны через нормированные диафрагмы (ДИКТ) на конце выкидной линии перед котлованом. Обработка этих данных

позволит обосновать значимые отличия в работе трещинной фильтрационной системы межсолевого резервуара на депрессии в выбранных режимах.

Реализованная Заказчиком в 2024–2026 годах Программа ГРР на ЛУ «Литиевый» впервые позволила прийти к обоснованному решению [2, 5, 6] о необходимости разработки самостоятельной конструкции разведочной гидрогеологической скважины (рис. 2) на межсолевой карбонатный резервуар в усольской свите. Перекрытие каждого высоконапорного пласта обсадной колонной существенно утяжелит конструкцию скважины – решение для одного пласта.

Флюидная система резервуара характеризуется наиболее высокими значениями пластовой энергии (Рпл). Это наиболее высокодебитная, до 8000 м^3/сут, и самая «богатая» по литию (723 мг/л) система залежей. Притоки из межсолевого пласта получены в восьми скважинах. В одной из них по решению Заказчика замерен высокий дебит (7500 м^3/сут) управляемого перелива межсолевого пласта в присутствии комиссии ПАО «Газпром».

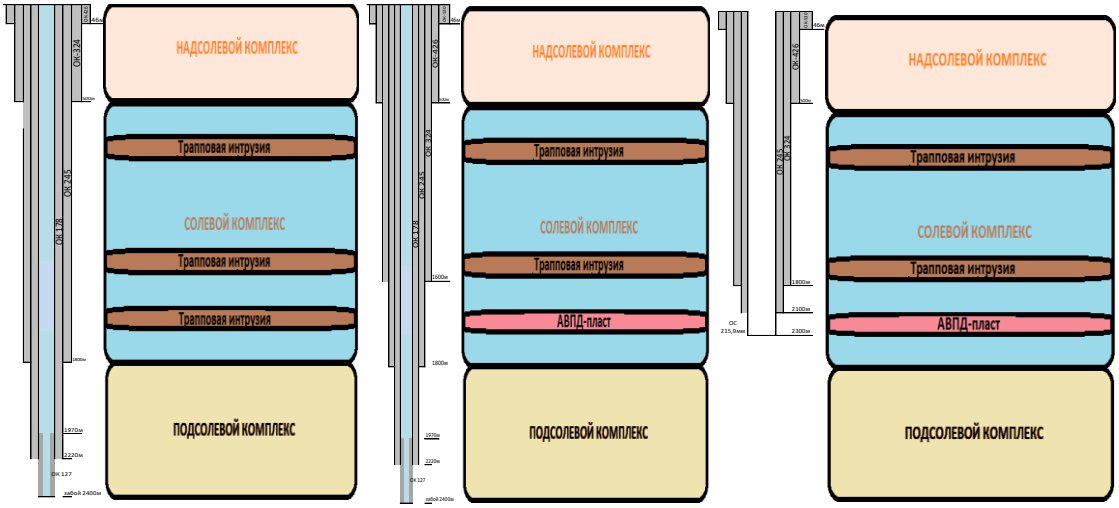


Рисунок 2 – Обоснование конструкции специальной гидрогеологической скважины

Содержание ряда крайне востребованных полезных компонентов в рассолах месторождений Восточной Сибири в промышленно значимых концентрациях ранее отмечалось в работах ряда авторов [1, 7]. Рассолы Ковыктинского месторождения представляют несомненный интерес, как источник целого ряда ценных компонентов по причине их высокой востребованности и существенных ресурсов, что меняет экономику процесса добычи и значительно повышает экономическую эффективность производства.

Сегодня существуют технологии последовательного извлечения ряда компонентов из рассолов, но они требуют детального изучения и доработки под конкретный состав рапы. Нами был изучен широкий круг потенциальных продуктов при комплексной переработке, а так же возможность вовлечения ряда отходов в качестве потенциального сырья для извлечения целевых компонентов. Наиболее значимы в качестве продуктов переработки рапы: соединения лития (карбонат, гидроксид), соединения магния (гидроксид, оксид), соединения стронция (карбонат, сульфат), соединения брома (молекулярный бром, бромиды натрия, кальция), соединения кальция [1, 7]. Наличие в составе рапы соединений РЗЭ в малых концентрациях ставит под сомнение вопрос экономической целесообразности их извлечения. Рассолы Ковыктинского месторождения относятся к хлоридному кальциевому типу, содержат значительное количество хлорида натрия, являющимся побочным продуктом. Использование хлорида натрия в электролитическом процессе позволит отказаться от хранения жидкого хлора на производственной площадке и организовать синтез в необходимых количествах для извлечения брома из рассолов [1]. Реализация комплексной технологии последовательного извлечения полезных компонентов из рапных рассолов Ковыктинского месторождения газа более эффективна, и позволит снять государственную зависимость в ценном сырье от импорта. Себестоимость добычи соединений лития из

пластовых вод находится в пределах 5–6 тыс USD при реализации комплексного подхода, а на готовой нефтегазовой инфраструктуре показатель может быть даже ниже.

В цикле рассматриваемых ГРР рапопроявляющий объект, залежь является целевым объектом бурения. Залежи редкометальных промышленных рассолов, «жидкой руды» на литий, рубидий, цезий, редкие земли, характеризуются аномально- высокими пластовыми давлениями (АВПД) и аномальными коллекторами (АК), чем обусловлена проблематика безопасной проводки глубокой скважины, от первичного вскрытия до последующих гидродинамических исследований и опытно-промышленной эксплуатации. На этапе ГРР решают комплекс задач изучения гидродинамических параметров пласта (трещинной зоны), гидрогеохимического опробования в и освоения месторождения (залежи) промышленных рассолов. На этапе освоения залежи, месторождения глубокими скважинами решается большой комплекс проблемных вопросов от безопасности и безаварийности буровых работ до обеспечения надежного бесперебойного функционирования глубоких скважин промысла [8–10].

Процесс углубления скважины в условиях контролируемого поступления насыщенного рассола (рапы) технологически реализуем. Процесс бурения с одновременной закачкой рассола в поглощающий пласт проверен и доказан практикой буровых работ на Знаменском месторождении.

Традиционные методы изоляции рапопроявляющих АВПД-интервалов, как правило, не приносят желаемого результата, т.к. рапоносный объект, обычно представлен деформируемым суперколлектором. И при создании депрессии трещины в нем имеют непостоянный размер, что влияет на качество изоляции таких трещин, в том числе и с течением времени. В свою очередь, спуск обсадной колонны сразу после вскрытия высоконапорного пласта не всегда гарантирует доведение скважины до проектного забоя, так как по фактическим данным бурения на юге Сибирской платформы по разрезу межсолевых кавернозно-трещинных высоконапорных пластов может быть несколько на 500–700 м разреза.

Заключение

Сложное геологическое строение объекта ГРР значительно детализировано в процессе специальных ГРР на промышленные воды. Предложенная авторами стратегия позволяет произвести анализ рисков на начальном этапе проектирования строительства скважины, оценить целесообразность принятых решений, внести дополнительные технические решения для реализации программы бурения скважины в сложных условиях, и вскрыть бурением интервал потенциальных рапопроявлений с минимизацией потенциальных рисков. Стоит отметить, что залежи богатейшего литиеносного гидроминерального сырья – концентрированных рассолов требуют особых подходов как в случае бурения и крепления глубоких скважин, так и в циклах испытания высокодебитной АВПД-системы и ее последующей эксплуатации [2, 5, 6, 8, 10, 11]. Именно эти особенности залежей «жидкой» литиевой руды – причина их отнесения к категории ТрИЗ. Технологические подходы в переработке сырья исследованы в стадии пилотных установок.

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.* монография. Иркутск: Географ. 2014. 162 с.

2. *Вахромеев А.Г.* Бурение скважин на нефть и газ в сложных горно-геологических условиях: трещинные природные резервуары, АНПД и АВПД пластовых флюидных систем / *А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, В.М. Иванишин, А.И. Ильин.* монография. Иркутск : Изд-во ИРНИТУ. 2019. 420 с.

3. *Мисюркеева Н.В.* Детализация надвиговых структур осадочного чехла в Ковыктинско-Хандинской зоне отраженной складчатости. / *Н.В. Мисюркеева, А.Г.*

Вахромеев, А.С. Смирнов, И.В. Буддо, И.В. Горлов, Г.Г. Шемин // Геодинамика и тектонофизика. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2s-0607.

4. *Вахромеев А.Г.* Гидрогеологические основы локального прогноза флюидонапорных систем с аномально высоким пластовым давлением в карбонатных природных резервуарах кембрия Ковыктинского газоконденсатного месторождения / *А.Г. Вахромеев, И.В. Горлов, Н.В. Мисюркеева, С.А. Сверкунов, Ю.А. Ланкин, А.С. Смирнов* // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2018. № 4 (36). С. 49–59.

5. *Вахромеев А.Г.* Технологические варианты первичного вскрытия бурением рапоносных пластов с АВПД ТРИЗ флюидов - литиеносных рассолов / *А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, И.А. Тиханович* // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2025. № 1(385). С. 19–30.

6. *Вахромеев А.Г.* Бурение на литиеносные промышленные рассолы, испытание продуктивного объекта: первый опыт и анализ результатов изучения месторождения / *А.Г. Вахромеев, И.А. Тиханович, С.А. Сверкунов, В.Н. Федоров, Ю.К. Ланкин, М.А. Данилова, А.Г. Малышев* // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Мат-лы науч. Конф.. Вып. 23. 2025 г., ИЗК СО РАН, г. Иркутск / отв. редактор Е.В. Скляров; Сибирское отделение РАН, Институт земной коры СО РАН. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2025. С. 41–43.

7. *Коцупало Н.П.* Комплексная переработка литиеносных бромсодержащих высокоминерализованных рассолов / *Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев, А.А. Кураков, Л.А. Серикова, Е.П. Гущина* // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 7. С. 70–76.

8. *Вахромеев А.Г.* Технологические варианты освоения литиеносных залежей ТРИЗ межсолевых рассолоносных пластов с АВПД флюидной системы / *А.Г. Вахромеев, А.С. Смирнов, С.А. Сверкунов, А.В. Сергеева, М.А. Данилова, А.В. Кирюхин, М.С. Пуляевский, Ю.К. Ланкин, И.А. Тиханович* // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2025. № 6(390). С. 5–13. DOI: 10.61726/7077.2025.37.13.001.

9. *Ланкин Ю.К.* Методика опытно-фильтрационных исследований (выпусков) из высоконапорных межсолевых продуктивных залежей промышленных литиеносных рассолов галогенно-карбонатной гидрогеологической формации Сибирской платформы / *Ю.К. Ланкин, А.Г. Вахромеев* // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3 (84). С. 315–320.

10. Опытно-фильтрационные исследования. Основные виды работ. Методы обработки / *Л.И. Аузина, А.Г. Вахромеев, Ю.К. Ланкин* Учеб. Пособие. Иркутск : Изд-во ИрНИТУ. 2016. 120 с. DOI: 10.61726/5814.2025.51.55.001.

11. *A. V. Kiryukhin, A. V. Sergeeva, A. G. Vakhromeev, at al.* Thermohydrodynamic Modeling of Well Operation of Chloride–Calcium Lithium-Bearing Brines ISSN 0742-0463, Journal of Volcanology and Seismology, 2026, Vol. 20, No. 2, pp. 175–189. © Pleiades Publishing, Ltd., 2026, DOI: 10.1134/S0742046326700053.

РАЗДЕЛ VI. ТЕХНОЛОГИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

CHAPTER VI. TECHNOLOGIES FOR DECENTRALIZED GEOTHERMAL ENERGY

УДК 556.3+536.7

Передовые технологии использования тепла Земли

С.Л. Елистратов

[1]*Институт теплофизики им.С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
elistratov@itp.nsc.ru
[2]*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*
[3]*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Представлены передовые технологии двух взаимосвязанных направлений развития геотермальной энергетики: добычи геотермальных ресурсов широкого температурного потенциала и технологий их практического использования в теплоэнергетических целях.

Advanced Technologies for Harnessing Earth's Heat

Sergey L. Elistratov

[1]*S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*
elistratov@itp.nsc.ru
[2]*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*
[3]*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Advanced technologies of two interrelated directions of geothermal energy development are presented: extraction of geothermal resources of wide temperature potential and technologies of their practical use for heat and power engineering purposes.

Передовые технологии использования тепла Земли решают разные задачи: от прямого отопления домов до масштабной выработки электричества. В целом тренд их развития направлен на более универсальное использование тепла Земли, преодоление локальности подземных тепловых ресурсов, снижение стоимости и расширение географии применения. Развитие крупных геотермальных электростанций и микрогеотермальных систем может обеспечить энергетическую независимость многих регионов, а также сократить выбросы вредных веществ парниковых газов. Уже сейчас существуют технологии, позволяющие генерировать энергию из тепла земных недр даже там, где отсутствуют залежи термальных вод.

Первостепенное значение имеют технологии извлечения и доставки тепловой энергии для наземного использования в теплоэнергетических установках. Современная геотермальная энергетика имеет высокие затраты на строительство и эксплуатацию геотермальных систем, а также ограниченность месторождений воды с высокой температурой. Бурение новых скважин сопряжено с большими капитальными затратами, составляющими более 50% стоимости ГеоЭС. По этой причине в качестве практической альтернативы рассматриваются уже пробуренные критически *обводненные нефтегазовые скважины* [1]. Наличие уже готовой инфраструктуры делает их применение весьма привлекательным для создания локальных инвестиционно привлекательных геотермальных энерго- и теплоисточников.

В последние годы обозначился тренд на использование *усовершенствованных геотермальных систем* (*Enhanced Geothermal Systems, EGS),* формирующих искусственные резервуары в горячих сухих породах, в т.ч. за счет гидроразрыва пласта как в нефтегазовой отрасли для увеличения площади контакта закачиваемой воды с высоконагретыми горными

породами. Главное преимущество EGS – возможность использовать глубинное тепло практически в любом регионе, а не только там, где есть естественные горячие водоносные горизонты. Технология позволяет работать с «сухими» горячими породами за счёт искусственного создания проницаемости (например, гидроразрывом) и организации циркуляции теплоносителя между нагнетательной и добычной скважинами. Это резко увеличивает потенциально доступный ресурсный фонд: по оценкам, запасы тепла в сухих породах на глубинах до 10 км многократно превышают текущие мировые энергопотребности. Перспективной областью применения EGS является петротермальная энергетика, которая фокусируется на глубинных сухих горячих породах, где температура может достигать +350 ℃ и более. Это позволяет извлекать на поверхность водяной пар сверхкритических параметров для выработки электроэнергии с КПД ≥60%. У *сверхкритических технологий* в геотермальной энергетике большой потенциал применения. В сверхкритическом состоянии: при температуре более 374 ℃ и давлении свыше 22.1 МПа, − у воды чрезвычайно высокий эксергетический потенциал, позволяющий на одной пробуренной скважине создавать ГеоЭС мегаваттного класса.

Для достижения глубин до 15 км и более рассматриваются технологии *сверхглубокого бурения* на основе мегаваттных гиротронов российского производства. Это открывает доступ к огромным запасам тепла, которые раньше были недоступны. Фирма Quaise Energy уже приступила к реализации этой технологии, где для разрушения твердых скальных пород на большой глубине используют не механическое долото, а миллиметровые волны. инициируемые в зоне контакта с горными породами мощным гиротороном. Излучение нагревает породу до нескольких тысяч градусов, а продуты ее испарения под давлением удаляются на поверхность, попутно формируя стеклообразную стенку скважины. Это решает проблему износа оборудования в твёрдых и очень горячих породах и потенциально открывает доступ к сверхгорячим слоям Земли. Имеются реальные примеры исследований и пилотных проектов. Например, согласно исландской программе Iceland Deep Drilling Project (IDDP) уже пробурены скважины в зоне вулкана Крафла и получен флюид с температура свыше 450 ℃, а в Китае в 2026 году запустили демонстрационный проект с замкнутым циклом на сверхкритическом CO_2.Перспективным решением для замкнутых циклов при освоении неглубоко залегающих подземных источников тепла может рассматриваться использование вместо воды *сверхкритического углекислого газа* CO_2 (критические параметры: 31.1 ℃ и 7.39 МПа). Как теплоноситель CO_2 обладает существенно меньшей вязкостью, что снижает потери при прокачке, повышает теплоотдачу и уменьшает энергопотребление на единицу утилизируемой тепловой энергии. В настоящее время также признано целесообразным совмещать добычу тепловой энергии с извлечением ценных компонентов, например лития, из геотермальных рассолов.

В перечень наземного оборудования входят геотермальные парокомпрессионные и абсорбционные тепловые насосы, энергетические установки на водяных и органических циклах Ренкина, гибридные энергосистемы с использованием теплоты сжигания водорода для перегрева водяного пара перед турбиной, а также комбинированные системы с накопителями электроэнергии.

Геотермальные тепловые насосы используют широко распространенные источники низкопотенциального (до 40 ℃) тепла верхних слоев грунта, грунтовых и артезианских вод для отопления и горячего водоснабжения. Один и тот же агрегат решает сразу несколько задач: отопления зимой, охлаждения летом (работает в режиме реверса как кондиционер) и нагрев горячей воды круглогодично. Это снижает общее количество оборудования и упрощает инженерные системы, что важно при проектировании и оценке жизненного цикла теплонасосных технологий. Современные модели геотермальных насосов, особенно их высокотемпературные модификации [2], используют в качестве рабочих тел вещества природного происхождения (CO_2, аммиак, изобутан и др.) с низким потенциалом глобального потепления, что соответствует мировому тренду на декарбонизацию. В качестве

перспективных для геотермального теплоснабжения рассматриваются абсорбционные тепловые насосы повышающего типа, способные трансформировать до половины некондиционного для теплоснабжения тепла воды низкотемпературных (40–45 °С) геотермальных скважин до уровня 60–75 °С для целей отопления и ГВС с предельно минимальными затратами 35–40 кВт электроэнергии на выработку 1.0 МВт тепла [3].

Бинарные энергетические установки, использующие для своей работы органические циклы Ренкина, позволяют эффективно генерировать электроэнергию на базе геотермальных источников с температурой 80–120 °С. Это принципиально расширяет базу полезно используемых геотермальных ресурсов: можно использовать не только высокотемпературные пароводяные смеси, но и тёплые воды. Их удобно также интегрировать в действующие ГеоЭС в качестве вторичного утилизационного контура, например, использовать тепло отсепарированной воды после основной паровой турбины. Это в итоге повышает общий КПД станции и увеличивает глубину полезной утилизации тепла геотермальных источников.

Новое решение в геотермальной энергетике – автоматизированные геотермальные теплоэнергетические комплексы (АГТЭК), – сочетают работу бинарных энергоустановок с накопителями электроэнергии и тепловыми насосами различных типов, оптимальным образом обеспечивая потребности потребителей в электроэнергии, теплоте и холоде (процесс тригенерации). Эта технология расширяет возможности создания децентрализованных систем жизнеобеспечения на базе геотермальных источников.

Работа выполнена при поддержке проекта FZSS-2025-0008 «Исследования и моделирование жизненного цикла объектов возобновляемой энергетики на территории Камчатского края».

Список литературы

1. *Елистратов С.Л.* Геотермальная энергия: настоящее и будущее. Вектор на Татарстан / *С.Л. Елистратов, С.В. Алексеенко, С.Р. Сверчков* // Наука и технологии Сибири. 2025. № 4 (19). С. 92–107.

2. *Елистратов С.Л.* Высокотемпературные тепловые насосы // В книге «Десять прорывных идей в энергетике на ближайшие десять лет» // Глобальная энергетическая ассоциация по развития международных исследований и проектов в области энергетики. 2021. С. 85–99.

3. *Алексеенко С.В.* Оценка эффективности применения абсорбционных тепловых насосов повышающего типа для теплоснабжения на основе среднетемпературных геотермальных источников / *С.В. Алексеенко, Д.Г. Мухин, К.И. Степанов, С.Л. Елистратов, Н.В. Миронова* // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2023. № 3 (60). С. 46–55. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-46-58.

РАЗДЕЛ VII. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ШКОЛА

CHAPTER VII. GEOTHERMAL SCHOOL

УДК 550.836 + 551.23

Интерпретация геотермотомографии Северо-Мутновской гидротермальной системы с использованием дифференциальных операторов

М.И. Афонин, А.В. Кирюхин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
univer1999ussr@mail.ru

В работе представлен метод интерпретации данных геотермотомографии Северо-Мутновской гидротермальной системы с использованием аппарата дифференциальных операторов. На основе регулярной 3D-сетки распределения температур с помощью разработанных авторами Python-скриптов методом конечных разностей второго порядка точности рассчитаны пространственные поля модуля градиента и лапласиана. Предложен комплексный количественный критерий локализации зон активной конвективной циркуляции. Результаты интерполированы и визуализированы в программе Surfer в виде вертикального разреза, показавшего высокую сходимость выделенного высокотемпературного ядра с дебитными эксплуатационными скважинами Мутновского месторождения.

Interpretation of Geothermotomography of the North-Mutnovsky Hydrothermal System Using Differential Operators

Mikhail I. Afonin, Alexey V. Kiryukhin

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

This paper presents a method for interpreting geothermotomography data of the North-Mutnovsky hydrothermal system using differential operators. Based on a regular 3D temperature grid, spatial fields of gradient magnitude and Laplacian were calculated by custom Python schemes using second-order finite-difference schemes. A comprehensive quantitative criterion for localizing active convective circulation zones is proposed. The results were interpolated and visualized in Surfer as a vertical cross-section, which showed high convergence of the identified high-temperature core with productive production wells of the Mutnovsky geothermal field.

Введение

Детальный количественный анализ и интерпретация данных геотермотомографии глубоких горизонтов гидротермальных систем является важнейшей прикладной задачей геотермальной вулканологии. Определение пространственных границ зон интенсивного тепломассопереноса необходимо для оптимизации разведки и эксплуатации геотермальных ресурсов. Настоящее исследование направлено на локализацию областей активной конвекции в пределах Северо-Мутновской гидротермальной системы на основе применения дифференциальных операторов первого и второго порядков. При этом мы опираемся на фундаментальные представления о гидрогеологии вулканогенных пород [1], а также на результаты численного моделирования тепло-проницаемой структуры, естественного состояния и истории долговременной эксплуатации резервуаров Мутновского высокотемпературного месторождения [2, 3].

Исходные данные и методика

В качестве исходных данных использован трехмерный цифровой массив геотермотомографии резервуара. Математические принципы и подходы к трехмерной реконструкции температурных полей в геотермальных коллекторах подробно рассмотрены в литературе [4, 5]. Температурное поле задано в виде регулярной 3D-сетки размерностью 201×521×31 узлов с равномерным пространственным шагом 50 м по всем координатным осям. Область численного моделирования ограничена координатами: X от 42 500 до 52 500 м, Y от 11 500 до 37 500 м, Z от −1 500 до 0 м (относительно уровня моря). Параметры расчетной области зафиксированы в табл. 1.

Таблица 1. Параметры расчетной сетки и координаты области моделирования

Параметр расчетной сетки	**Значение параметра**
Размерность сетки (узлы по осям X, Y, Z)	201 × 521 × 31
Шаг дискретизации сетки (м)	50.0
Границы области по оси X (м)	42 500 – 52 500
Границы области по оси Y (м)	11 500 – 37 500
Границы области по оси Z (м)	−1 500 – 0.0

Математический расчет дифференциальных операторов на регулярной расчетной сетке температур $T(x, y, z)$ был полностью реализован в виде специализированных скриптов на языке Python. Для вычисления пространственных массивов модуля вектора градиента температур $|\nabla T|$, отражающего интенсивность локального изменения теплового поля, использовалась центральная конечно-разностная схема первой производной по каждой координатной оси. Для компоненты по оси X расчетное выражение имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2h} + O(h^2) \quad (1)$$

где h = 50 м – пространственный шаг дискретизации сетки, а i, j, k – индексы узлов расчетной сетки по осям X, Y, Z. Обоснование второго порядка точности O(h²) данной схемы следует из разложения значений температуры в окрестности узла в ряд Тейлора:

$$T_{i+1} = T_i + h\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{h^2}{2}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{h^3}{6}\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} + O(h^4) \quad (2)$$

$$T_{i-1} = T_i - h\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{h^2}{2}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h^3}{6}\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} + O(h^4) \quad (3)$$

Вычитание равенства (3) из равенства (2) исключает члены со второй производной (h²) и позволяет выразить первую производную, где главный член погрешности аппроксимации пропорционален квадрату шага h^2, что строго доказывает второй порядок точности. Итоговый модуль градиента определялся по формуле:

$$|\nabla T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (4)$$

Для вычисления скалярного лапласиана ∇²T, характеризующего кривизну температурного распределения, применялся дискретный оператор на семиточечном шаблоне:

$$\nabla^2 T \approx \frac{T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}}{h^2} + \frac{T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}}{h^2} + \frac{T_{i,j,k+1} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j,k-1}}{h^2} + O(h^2) \quad (5)$$

Обоснование порядка точности $O(h^2)$ для оператора Лапласа (5) базируется на сложении рядов Тейлора для симметричных узлов по каждой пространственной оси. При их сложении взаимно уничтожаются нечетные степени шага (h и h^3), а деление результирующего выражения на h^2 оставляет старший член погрешности аппроксимации в виде квадратичной функции $O(h^2)$.

Значения $\nabla^2 T \approx 0$ физически интерпретировались как зоны гладкого поля со стационарным кондуктивным теплопереносом, тогда как отклонения от нуля фиксировали локальные неоднородности и границы динамических флюидных структур.

Результаты и обсуждение

На основе выполненного дифференциального анализа трехмерных массивов геотермотомографии были сформулированы и применены два сопряженных количественных критерия для надежного выделения областей активной конвективной циркуляции теплоносителя:

1. Температурный порог ($T > 240$ °C: ограничивает границы наиболее разогретого высокотемпературного ядра геотермального резервуара, соответствующего двухфазному термодинамическому состоянию теплоносителя (кипящая вода + пар). Выделение данного интервала полностью согласуется с результатами моделирования термогидрогеохимических процессов формирования продуктивных коллекторов в вулканогенных породах Мутновского района, а также физическими моделями эксплуатации магма-гидротермальных суперкритических систем [7].

2. Градиентный порог ($|\nabla T| < 0.12$ °C/м): фиксирует слабую пространственную изменчивость температуры. Минимальные значения модуля градиента служат физическим индикатором выравнивания теплового поля по вертикали вследствие интенсивного конвективного перемешивания флюида.

Полученные расчетные массивы критериев были импортированы в программный комплекс Surfer для финальной двумерной интерполяции и построения вертикального разреза по профилю DD (X = 46 000 м, Y = 12 000–30 000 м).

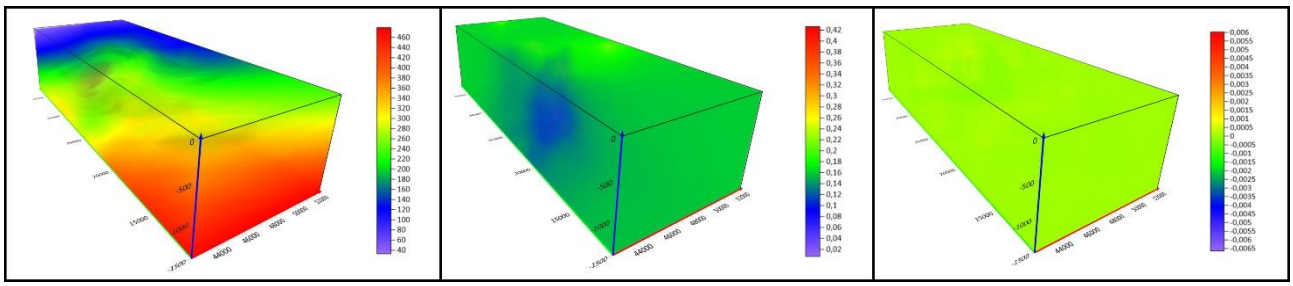


Рисунок 1 – Трехмерные модели элементов температурного поля Северо-Мутновской гидротермальной системы: слева – температура (T), в центре – модуль градиента (|∇T|), справа – скалярный лапласиан (∇²T)

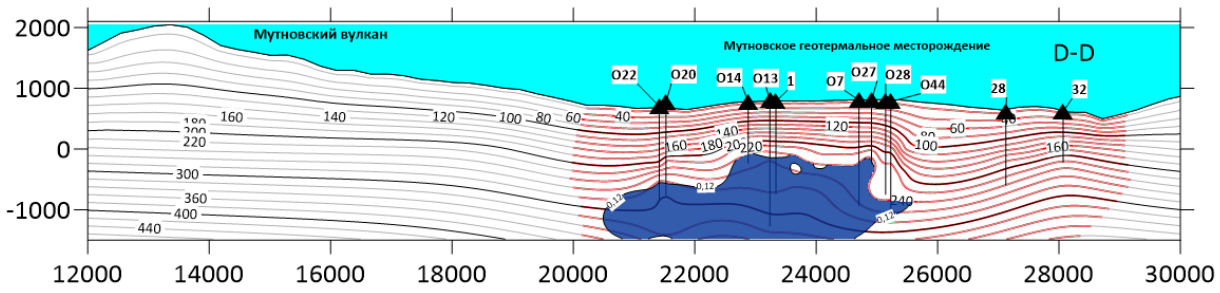


Рисунок 2 – Вертикальный разрез DD с изотермами и выделенными зонами конвективной циркуляции

Построенный разрез (рис. 2) наглядно визуализирует пространственную геометрию конвективных ячеек и положение восходящих гидротермальных потоков. Отмечена высокая сходимость пространственного положения выделенного конвективного ядра с интервалами заложения наиболее дебитных эксплуатационных скважин Мутновского геотермального месторождения (включая скважины 013, 014, 022, 027).

Выводы

1. С использованием разработанных Python-скриптов выполнена дифференциальная обработка данных 3D-геотермотомографии Северо-Мутновской гидротермальной системы конечно-разностным методом второго порядка точности.

2. На основе совместного анализа полей температуры и модуля градиента обоснован комплексный критерий ($T > 240$ ℃, $|\nabla T| < 0.12$ ℃/м), позволивший локализовать зоны активного конвективного перемешивания теплоносителя.

3. Проведенная в программной среде Surfer визуализация вертикального разреза по профилю DD подтвердила пространственную связь выделенного конвективного ядра с продуктивными зонами эксплуатационных скважин Мутновского месторождения.

Исследование выполнено по теме FWME-2024-0007
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Гидрогеология вулканогенов / *А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин.* СПб: Наука. 2010. 395 с.

2. *Kiryukhin A.V.* Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high-temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) / *A.V. Kiryukhin, O.O. Usacheva, P.A. Kiryukhin* // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. Vol. 356. pp. 36–51. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.02.010.

3. *Кирюхин А.В.* Инверсионное моделирование естественного состояния и истории эксплуатации Мутновского геотермального месторождения 1986–2006 годов / *А.В. Кирюхин, О.О. Усачева* // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 163–169.

4. *Kiryukhin A.V.* Three-dimensional temperature field reconstruction in geothermal reservoirs based on the spline approximation of Green's formula / *A.V. Kiryukhin, D.M. Fage, S.L. Perveev, D.N. Gusev* // Stanford Geothermal Workshop. 1989. P. 135–141.

5. *Кирюхин А.В.* Применение геотермотомографии для выявления продуктивных геотермальных резервуаров и зон конвективной циркуляции теплоносителя в Северо-Мутновской гидротермальной системе (Камчатка, Россия) / *А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, О.О. Усачева* // Journal of Volcanology and Seismology, 2026, Vol. 20. No. 6 (в печати).

6. *Кирюхин А.В.* Моделирование термогидрогеохимических условий формирования продуктивных резервуаров в вулканогенных породах / *А.В. Кирюхин, С.В. Шадрина, М.Ю. Пузанков* // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 90–104.

7. *Pashkevich R.I.* Numerical simulation of exploitation of supercritical enhanced geothermal system / *R.I. Pashkevich, V.V. Taskin* // Proceedings, 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University. 2009. SGP-TR-187.

УДК 550.367

Оценка геотермального потенциала Северо-Мутновской гидротермальной системы (Камчатка)

В.В. Василевская[1], Е.Д. Деева[2], М.Р. Литвинов[3]

[1]*Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*
hedewoff@gmail.com
[2]*Московский физико-технический институт (МФТИ), Долгопрудный, Россия*
[3]*Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия*

В работе проведена предварительная оценка геотермальных ресурсов Северо-Мутновской гидротермальной системы на основе анализа температурных данных и объемного метода расчета теплосодержания. Построены геотемпературные разрезы (термотомография) на отметках −250, −750 и −1250 м. Анализ полученного температурного распределения позволил выделить на каждом из исследуемых глубин локальные высокотемпературные зоны, которые будут рассматриваться как наиболее перспективные участки гидротермального резервуара для дальнейшей оценки ресурсного потенциала. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения пространственной структуры резервуара, последующего термогидродинамического моделирования и обоснования размещения эксплуатационно-разведочных и нагнетательных скважин.

Assessment of the Geothermal Potential of the North-Mutnovsky Hydrothermal System

Victoria V. Vasilevskaya[1], Ekaterina D. Deeva[2], Maxim R. Litvinov[3]

[1]*St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russia*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia*
[3]*Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia*

This study presents a preliminary assessment of the geothermal resources of the North-Mutnovsky hydrothermal system based on the analysis of temperature data and a volumetric heat-content estimation method. Geothermal cross-sections (thermal tomography) were constructed at elevations of −250, −750, and −1250 m. Analysis of the resulting temperature distribution identified local high-temperature zones at each of the investigated depth levels. Heat content was calculated for the selected zones using a volumetric method that accounts for rock porosity, density, and heat capacity, as well as the thermodynamic properties of water. The results may be used to refine the spatial structure of the reservoir, support subsequent thermodynamic modelling, and substantiate the placement of production–exploration and injection wells.

Северо-Мутновская система представляет собой классическую конвективную гидротермальную систему вулканического типа. Температурный режим системы характеризуется высокими значениями и значительными термическими градиентами. По данным термометрии эксплуатационных и разведочных скважин, температуры в продуктивных горизонтах достигают 280–300 °C.

Интерполяция исходного массива температур позволила построить температурные срезы для Северо-Мутновской гидротермальной системы на абсолютных отметках −250 м, −750 м и −1250 м (рис. 1). Полученные карты отражают пространственную неоднородность температурного поля, обусловленную сочетанием теплового влияния глубинного источника, проницаемых разломно-трещинных зон и гидродинамических условий циркуляции теплоносителя. На всех исследуемых глубинах в пределах контура системы выделяются локальные области повышения температур. При этом южная часть контура не рассматривалась как отдельный объект ресурсной оценки: плавное повышение температур в данном направлении, вероятно, отражает региональное тепловое воздействие вулканического центра, а не локализованный продуктивный участок.

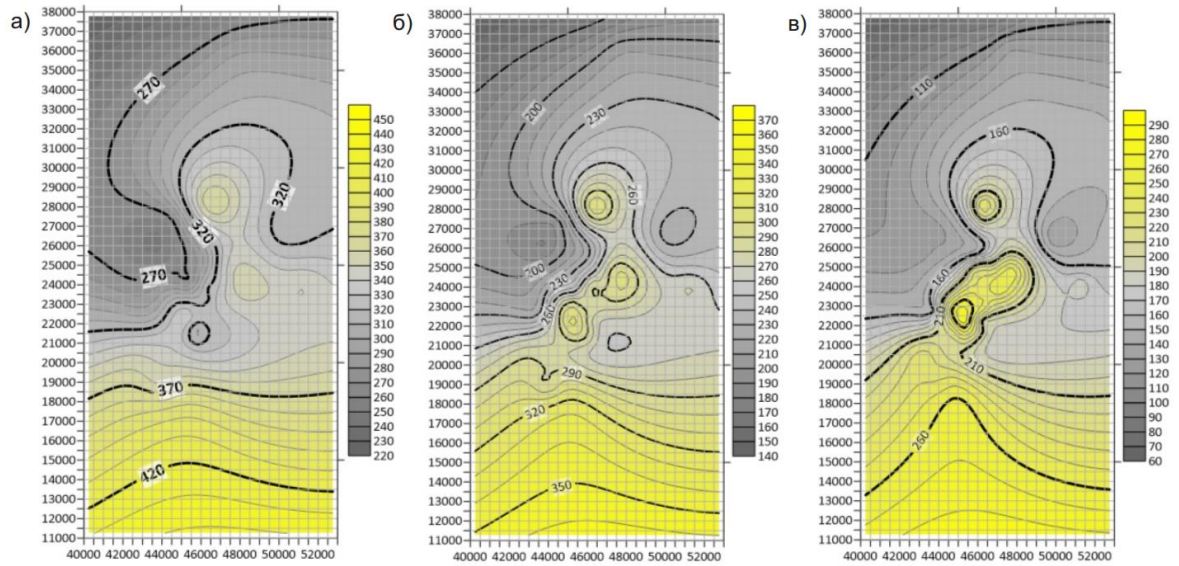


Рисунок 1 – Геотемпературные срезы по абсолютным отметкам
а) −1250 м, б) −750 м, в) −250 м с соответствующими градусными шкалами

Максимальные интерполированные температуры в пределах выделенных зон составили 367.7 °C на отметке −1250 м, 313.1 °C на отметке −750 м и 275.5 °C на отметке −250 м, что подтверждает высокотемпературный характер рассматриваемой гидротермальной системы.

Результаты

Количественная оценка геотермальных ресурсов для выделенных перспективных зон выполнена объемным методом по формуле (1). Расчетная область была дискретизирована на элементарные блоки площадью 500×500 м, при условной мощности пласта 500 м, расчетный объем составил 125 000 000 м^3. Теплосодержание каждого блока определялось с учетом вклада минеральной матрицы и порового флюида (в рамках предварительной оценки, поровое пространство считалось заполненным однофазным флюидом, водой):

$$\mathrm{M} = (1-\phi)\cdot C_R \cdot T \cdot \rho_R + \phi \cdot \rho_\beta \cdot U_\beta \ , \qquad (1)$$

где ϕ – пористость; C_R – удельная теплоемкость, Дж/кг · °C; ρ_R – минеральная плотность, кг/м^3; T – температура, °C; ρ_β – плотность воды, кг/м^3; U_β – внутренняя энергия воды, Дж/кг; P – давление воды, Па. U_β находится по формуле $U = h - P/\rho$, где h – энтальпия воды, Дж/кг.

Параметры пород задавались дифференцированно для исследуемых глубинных уровней с учетом опубликованных А.В. Кирюхиным в 2018 г. [1] данных (данные приведены в табл. 1) теплофизических и фильтрационных свойств пород Мутновского геотермального поля. При известных значениях членов, геотермальные ресурсы срезов −1250, −750 и −250 м равны $101 \cdot 10^{18}$, $104 \cdot 10^{18}$ и $105 \cdot 10^{18}$ Дж соответственно. Что немного больше расчётных ресурсов по данным В.М. Сугробова [2] , который рассчитал $46 \pm 9 \cdot 10^{18}$ Дж. Это может быть обусловлено отличием объёма резервуара и обновленными исходными данными.

Таблица 1. Значения петрофизических параметров и схемой моделей глубин

Модель породы	MAGM	MAGMF	CONT1	CONT2	SAND1	SAND2
Проницаемость, 10^{-15}м^2	0.001	2.7	616	0.001	85	0.001
Пористость	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
Плотность минеральная, кг/м^3	2700	2700	2400	2400	2300	2300
Теплопроводность, Вт/м·С	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Удельная теплоёмкость, Дж/кг·С	1000	1000	1000	1000	1000	1000

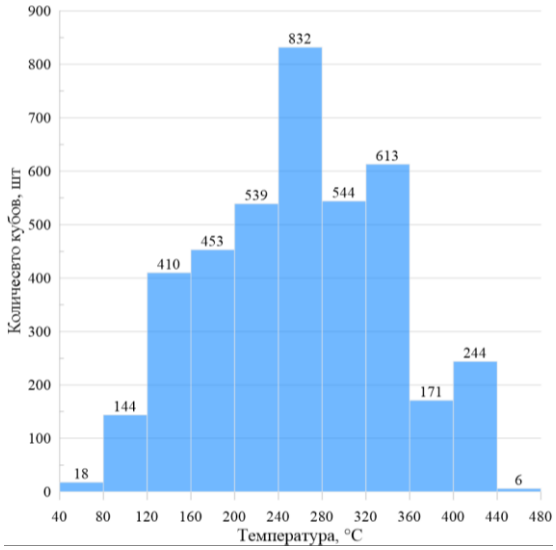


Рисунок 3 – Гистограмма распределения геотермальных ресурсов

Суммирование теплосодержания блоков позволило получить предварительную оценку геотермального потенциала района (рис. 3). Технологии использования геотермальных ресурсов зависят в основном от температуры. В настоящее время в исследуемом районе отрабатывается диапазон от 260 до 290 °C для прямого использования пара в 2 кг/с на 1 МВт.

Диапазон температур велик, при этом определенные условия проверены на длительных эксплуатациях Мутновской и Паужетской ГеоЭС. В зоне 240–300 °C идёт получение энергии напрямую, в зоне 160–200 °C это тоже возможно, но с понижением эффективности. Перспективной зоной для бинарных исследований по циклу Ранкина является 100-120 °C.

Выводы

Полученные в ходе расчетов значения характеризуют исключительно общее теплосодержание минеральной матрицы и порового флюида в недрах. Они не являются оценкой извлекаемых или технически доступных геотермальных ресурсов, так как не учитывают технологические ограничения, гидродинамические потери и реальный коэффициент извлечения тепла.

Тем не менее, полученные данные и выделенные перспективные контуры служат основой для перехода к следующему этапу исследований. В частности, они могут быть использованы для построения полноценной трехмерной термодинамической модели, уточнения ресурсной базы, а также для научно обоснованного размещения эксплуатационно-разведочных и нагнетательных скважин на Мутновском геотермальном месторождении.

Выражаем благодарность А.В. Кирюхину за проделанный труд.

Список литературы

1. *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, P.A. Kiryukhin* // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2018.

2. *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.

Научное издание

Материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2026) 6 – 12 сентября 2026 г.

Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2026), September 6 – 12, 2026

Подписано к печати XX.10.2026
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

© Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2026