

Е. П. БЕССОНОВА, Г. Л. ПАНИН

ГОРЯЧАЯ КРОВЬ ЗЕМЛИ

неинвазивная диагностика вулкана

На активных вулканах происходят события, которые являются отражением процессов, протекающих в глубине планеты. Оттуда по естественным каналам поднимается «кровь Земли» – термальные флюиды, выносящие на поверхность смесь веществ, богатую редкими химическими элементами.

С помощью геоэлектрических исследований и физико-химического моделирования ученые получают информацию о путях миграции этих элементов. Практический смысл данных работ – разработка новой методики поиска рудных месторождений и месторождений термальных вод



БЕССОНОВА Елизавета Павловна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования динамики эндогенных и экзогенных систем Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева (Новосибирск). Автор и соавтор более 70 работ



ПАНИН Григорий Леонидович – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука (Новосибирск). Автор и соавтор 7 печатных работ

Ключевые слова: вулcano-гидротермальные системы, гидрогеохимия термальных источников, геофизические методы неразрушающего контроля, физико-химическое моделирование.

Key words: volcano-hydrothermal systems, hydrogeochemistry of thermal springs, geophysical methods of non-destructive testing, physicochemical modelling



Активные вулканы – уникальные геологические объекты, на их склонах и в кратерах часто появляются источники термальных вод и газов. Эти явления – отражение процессов, происходящих в раскаленных глубинах Земли, поскольку территории современного вулканизма связаны с зонами активных геодинамических процессов (Добрецов и др., 2001). В частности, все российские действующие вулканы возникли над зоной *субдукции* – областью, где под континентальную тектоническую плиту погружается океаническая плита. В некоторых местах ее материал плавится, образуя магматические очаги. Выходящие на поверхность газо-гидротермальные потоки, очевидно, формируются на основе расплавленного вещества из таких «очагов».

Основную роль в процессах формирования вулканических термальных растворов играют грунтовые воды, осуществляющие перенос тепла и вещества. Фильтруясь сквозь толщу вулканогенных пород, вода выборочно «выщелачивает» из них химические элементы, которые переходят в растворимую форму. Среди пополняющих раствор элементов могут быть и породообразующие (кремний, алюминий, кальций), и примесные (микроэлементы). Но большая их часть так и не достигает поверхности. Причина этого кроется в трудностях пути наверх.

Вулкан Мутновский – один из самых больших и наиболее активных вулканов Южной Камчатки. Морфологически это сложный горный массив, состоящий из четырех слившихся конусов древних вулканов. Современная вулканическая активность проявляется лишь в северной его части, где имеется система перекрывающих друг друга кратеров. Дно самых больших из них, Северо-Восточного и Юго-Западного, почти полностью перекрыто современными ледниками. Интенсивная фумарольная деятельность сосредоточена в Северо-Восточном кратере (в центре фото) и в Активной воронке (справа).

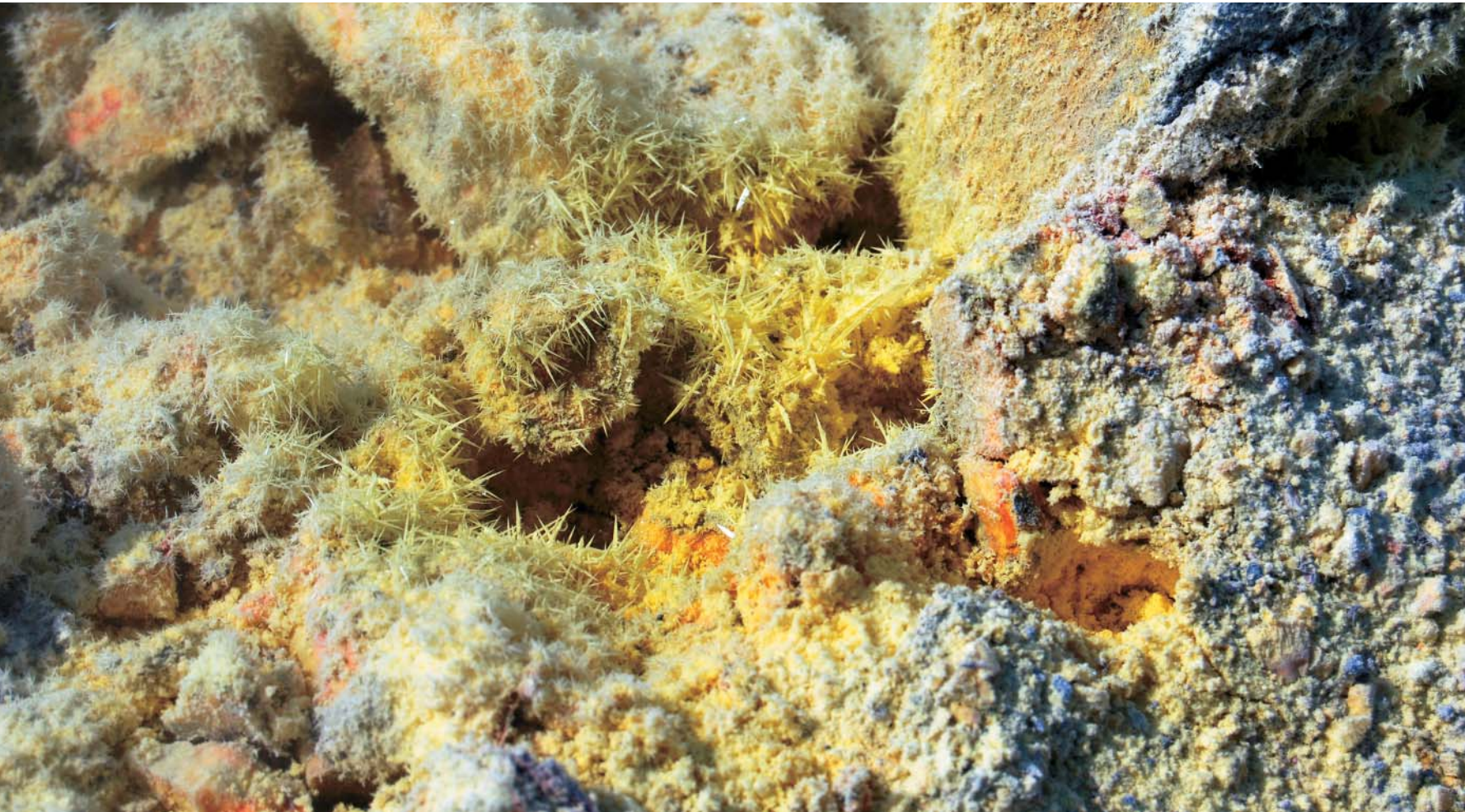
ФУМАРОЛЫ – источники горячего газа магматического происхождения, исходящего через отверстие в кратере или на склоне вулкана. Как правило, над крупными фумаролами клубится густой пар, поскольку в магме содержится большое количество воды, которая конденсируется на холодном воздухе. Помимо воды, через фумаролы выделяется углекислый газ, сероводород, галогеноводороды и др.

ТЕРМЫ – источники горячей (термальной) сильноминерализованной воды, бьющие в активных вулканических областях. Химический состав и температура изливающегося раствора непостоянны

ГЕЙЗЕРЫ – источники, периодически выбрасывающие фонтанами горячую воду с паром

Вода горячих источников вулкана Мутновский ультракислая. Чтобы вот так запросто стоять в ручье, нужны кислотоупорные сапоги





Кристаллическая сера образуется при окислении на воздухе одного из главных компонентов фумарольного газа – сероводорода H_2S

Восхождение из адского пекла

Восходящие потоки магматического флюида встречаются на своем пути с различными препятствиями. Они возникают из-за того, что толща земной коры сложена слоями разной степени проницаемости, которые образуют самые причудливые конфигурации. Из-за наличия таких геоструктурных особенностей пути миграции флюидов к поверхности представляют собой извилистые линии, которые могут многократно пересекаться и ветвиться.

Прилегающие друг к другу слои (горизонты) вулканических пород иногда резко различаются по физико-химическим свойствам. Граница раздела между ними является своего рода полупроницаемым барьером, потому что проходящий через него флюид может претерпевать фазовое разделение с разными скоростями

движения фаз. Когда при этом происходит перемещение компонентов между фазами, тогда говорят о возникновении геохимического барьера.

Например, снижение проницаемости приводит к увеличению давления в потоке, что может вызвать конденсацию и расслоение газообразного флюида на жидкий конденсат и насыщенный влажный пар. К подобному явлению приводит и взаимодействие флюида с более холодными грунтовыми водами. В последнем случае конденсат может перемешиваться с водой, при этом степень смешения (разбавления) и обмена ионами определяется разностью температур и соотношением между потоками флюида и воды.

Вход в слой с большей проницаемостью приводит, наоборот, к резкому спаду давления. При этом жидкий флюид может вскипать; тогда в паровую фазу (сепарат) частично переходят летучие компоненты (CO_2 , H_2S , HCl и т. п.), а металлы в виде гидроксидов и солей остаются и концентрируются в жидком конденсате. Так формируется рудоносный флюид, который в благоприятных условиях может

в итоге образовать рудное месторождение.

На пути флюида к поверхности Земли фазовые переходы из газообразного состояния в жидкое и обратно могут происходить неоднократно. При этом процессы массопереноса определяют изменение физико-химических свойств (в том числе и элементного состава) термальных растворов по пути следования вплоть до разгрузки их компонентов на поверхности Земли.

Важно отметить, что процессы переноса веществ идут частично, а не «до победного конца». Это значит, что в итоговом растворе, бьющем из источника, остаются следы всех химических элементов, хотя большую часть их он мог растерять по дороге. По этим следам в принципе можно не только прочесть историю его формирования, но и предсказать, где искать «потери».

Ищем клад

Для практического прогнозирования рудных месторождений и термальных вод нужны более точные фундаментальные знания о происхождении и эволюции

Геохимический барьер – зона резкого уменьшения миграционной способности каких-либо химических элементов. Процесс сопровождается их осаждением из термального раствора, что приводит к локальному повышению концентрации данных элементов в горной породе. Таким образом, геохимические барьеры играют важную роль в процессах рудообразования

Самородная сера бывает как очень чистой, так и с примесью различных химических элементов, например: Be , As , V , Zn , Ag , Pb , Ba , Bi и т. д. Именно на активных вулканах добывают самородную серу для нужд химической промышленности





гидротермальных флюидов, систематизированные в рамках единой теории. На современных вулканах исследователи получают фактическую информацию (совокупность гидрогеохимических и геофизических данных), необходимую для конструирования такой теории.

Вначале следует изучить строение гидротермальной системы вулкана и понять процессы и механизмы перехода в раствор и отложения химических элементов на пути миграции флюида, при этом немаловажную роль играет физико-химическое моделирование. Но для понимания условий формирования солевого состава подземных вод важно, чтобы в основу исследования были положены объективные измеряемые физико-химические параметры водной и вмещающей среды: температура и проводимость, соотношения основных ионов и микроэлементов, состав газа и т. д.

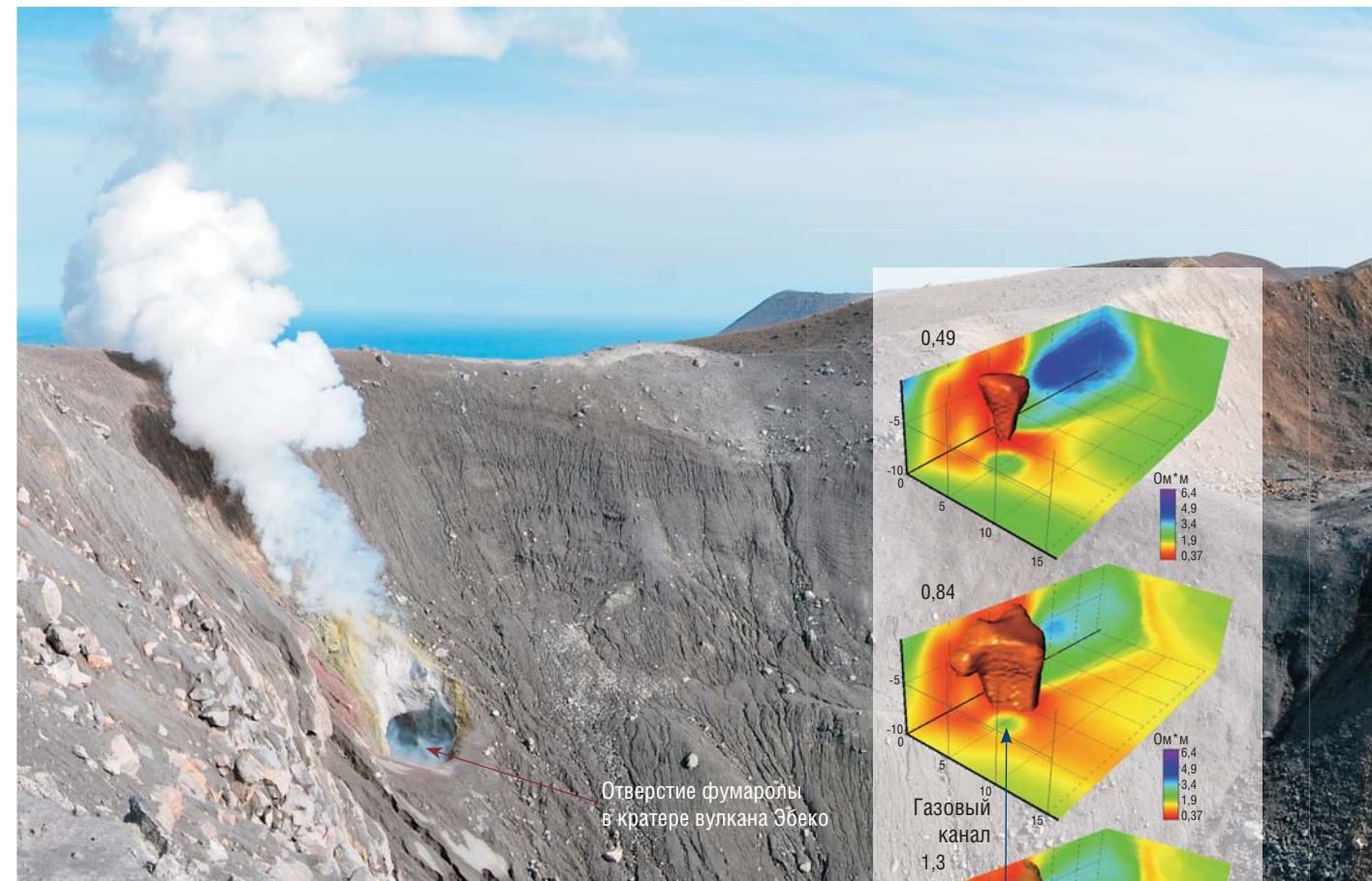
Натурное исследование объекта осложняется присутствием подвижных фаз. Механическое бурение скважины для отбора проб на глубине неминуемо разрушило бы структуру потоков в вулcano-гидротермальной системе, поэтому такой метод не сможет дать объективной картины изучаемых процессов.

К счастью, последние несколько лет геофизики интенсивно развива-

ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ

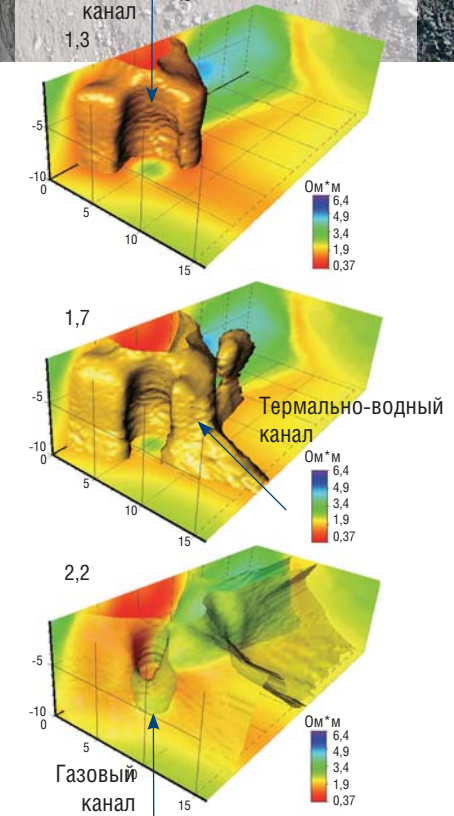
Для выполнения работ методом электротомографии использовались электроразведочные станции компании Iris Instruments и отечественный прибор из серии «Скала», прототип которого был разработан в 2008 г. в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН. Получаемая информация требует последующей компьютерной обработки результатов измерения

Для электротомографического исследования грунта на ряд заземленных электродов подают электропитание. При этом возникает электрическое поле, которое можно оцифровать, измеряя электрические потенциалы на поверхности вдоль линии тока. Из цифровой картины поля вычисляют удельное электрическое сопротивление (УЭС) грунта в ключевых точках секущей вертикальной плоскости. Выполнив ряд параллельных геоэлектрических «разрезов», получают информацию для построения 3D карты УЭС поверхностного слоя грунта. По этой карте изучают геометрические особенности слагающих его пород и наполняющих их флюидах. Этот метод можно использовать даже в условиях, когда изучаемое пространство имеет сильно неоднородное строение с широким диапазоном УЭС, что типично для гидротермальных объектов. Дальность (глубина) измерений ограничена несколькими десятками метров, точность локализации – порядка одного метра



Газовый канал является практически изолятором по сравнению с высокой электропроводностью каналов питания кипящих котлов. А эти каналы, в свою очередь, также выделяются на фоне вмещающих пород с гораздо большим удельным электрическим сопротивлением. Так, на площадке Кипящих котлов Донного фумарольного поля вулкана Мутновский при электромагнитном зондировании идентифицирован вертикальный газовый канал работающей фумаролы и окружающая его структура путей питания самих котлов

ют технологии дистанционного неразрушающего контроля. Например, по электропроводности грунта можно установить, какая фаза (газообразная или жидкая) его наполняет, а также уровень его проницаемости. К неразрушающим методам относят, например, электротомографию (ЭТГ) и частотное электромагнитное зондирование (ЧЭЗ) – их часто используют для решения инженерно-строительных задач и при археологических исследованиях. С помощью обоих методов получают карту неоднородностей грунта, отличающихся удельным электрическим сопротивлением (УЭС). Электротомография – метод наиболее зрелый и проверенный. В геоэлектрике он по праву может считаться реперным и дающим максимально точное значение глубины объектов. Более информативным инструментом для определения фазовой структуры гидротермальных систем является частотное зондирование.





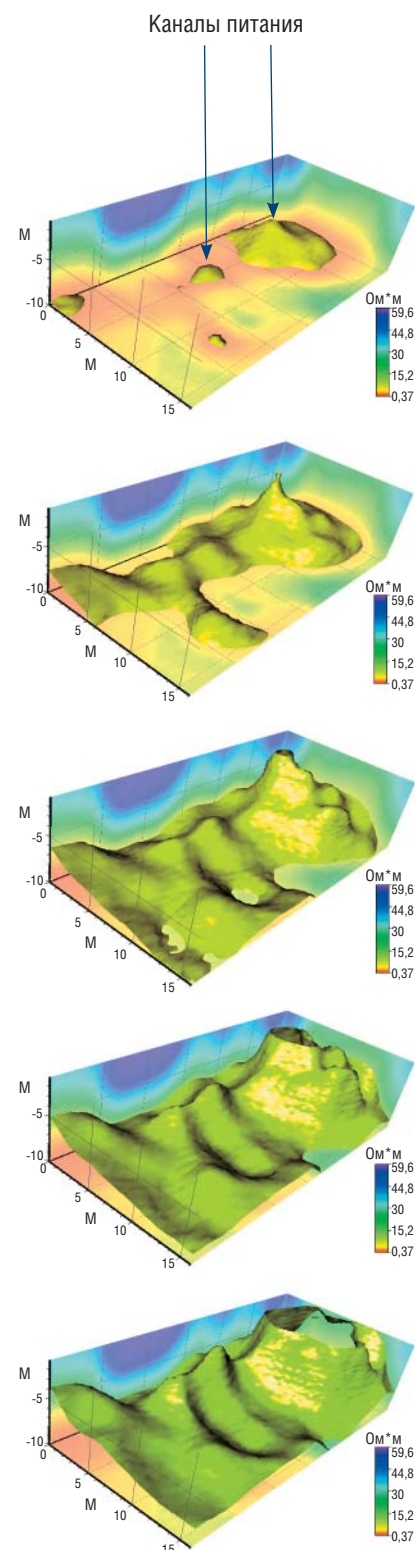
Электромагнитный сканер, работающий на основе метода частотного зондирования, разработан в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН.

Программный комплекс предоставляет пользователю визуальный интерфейс: данные измерения оператор наблюдает на экране непосредственно во время работы – в реальном времени. Интерпретация данных зондирования осуществляется на основе алгоритма, разработанного в том же институте

ЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Метод частотного зондирования основан на явлении электромагнитной индукции. В окружающее пространство генерируют электромагнитный сигнал и с помощью математической обработки отраженного сигнала получают карту распределения УЭС. Этот метод (в отличие от электротомографии) не требует гальванического контакта с землей.

Глубина зондирования определяется частотой сигнала и ограничена, как правило, несколькими метрами



Горячая кровь

На территории России в течение последнего десятилетия активную деятельность проявляли вулканы Мутновский (Южная Камчатка) и Эбеко (Северные Курилы), что представляет несомненный интерес для геологов.

Термальные растворы этих вулканов обладают сильной кислотностью (рН может достигать 0,5); главные химические элементы кислотообразующих анионов – хлор и сера. Катионный состав намного более разнообразен – он представлен десятками металлов.

Кроме того, исследователи отмечают весьма интересный факт: в водах двух терм, расположенных всего лишь в нескольких метрах друг от друга, катионный состав иной раз контрастно различается. В чем кроется причина этого явления? Кажется бы, потоки вещества, питающие эти термы, имеют один и тот же источник и проходят к поверхности Земли сквозь одинаковую толщу и практически рядом.

Загадочная причина гидрогеохимической неоднородности близко расположенных термальных источников и побудила сотрудников Института геологии и минералогии и Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН заняться

Среди других термальных источников на Донном поле вулкана Мутновский встречаются так называемые «рыжие» водоемы, цвет воды в которых обусловлен большим содержанием железа. Причина их наличия в окружении «нормальных» (серых) вод до недавнего времени оставалась загадкой.

Лишь благодаря высокому пространственному разрешению метода частотного электромагнитного зондирования исследователи выявили узкие обособленные каналы глубинной подпитки этих «озерц»

совместными исследованиями этих вулканов, чтобы понять пути миграции растворов и превращения, которые они претерпевают на своем пути к поверхности.

Следует заметить, что поверхностные слои земли характеризуются высоким вертикальным градиентом температуры и концентрации кислорода. Такой геохимический барьер является благоприятным фактором отложения вещества на небольшой глубине (порядка десяти метров). Поэтому изучение термальных полей в непосредственной близости от поверхности Земли представляет наибольший интерес. Сибирские ученые впервые в России применили для этой цели малоглубинные методы геофизики – электротомографию и частотное электромагнитное зондирование.

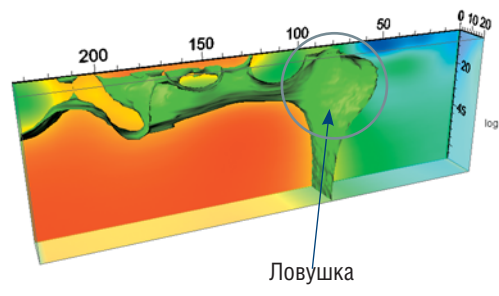
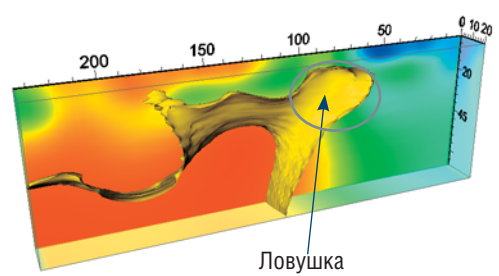
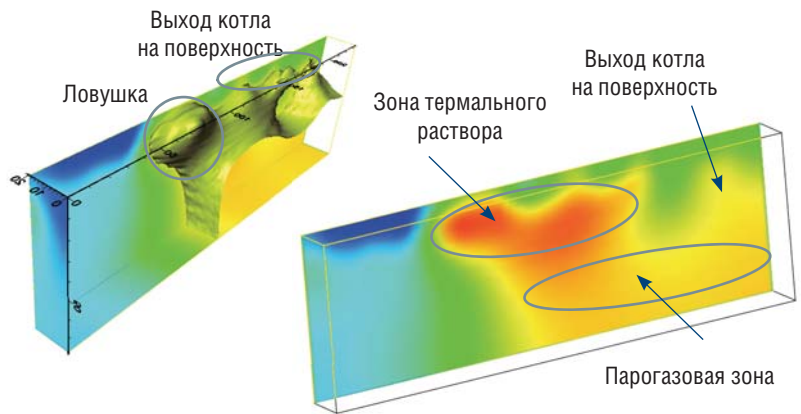
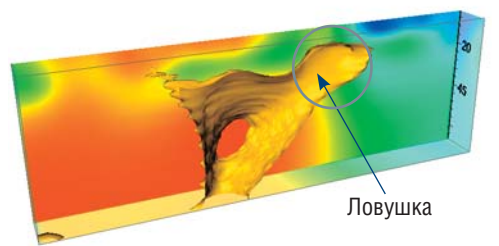
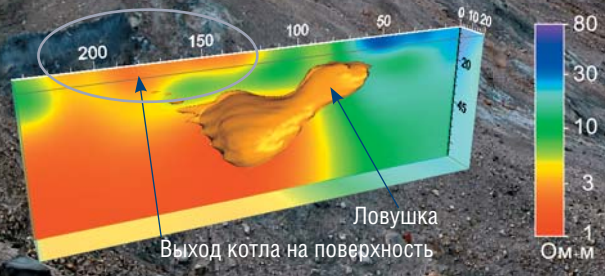
Электротомографией выявляются неоднородности на глубине в несколько десятков метров, однако пространственное разрешение этого метода невысоко. При частотном зондировании достигается более высокая детализация, но предельная глубина меньше. Поэтому была выбрана последовательная методика исследований: сначала с помощью электротомографии получали приблизительную карту поля УЭС под исследуемой территорией и по ней определяли места, наиболее интересные для геохимической съемки. Затем детальное зондирование выполняли аппаратурой, работающей на основе метода частотного зондирования.

В ходе полевых исследований специалисты использовали не только традиционные, но и специально разработанные для изучения гидротерм методики. Одна из них связана с наложением постоянного электрического поля при частотном зондировании, что позволяло более контрастно проявить проницаемые водонасыщенные каналы.

Разных полей «ягоды»

На термальной площадке Донного поля вулкана Мутновский есть грязевые котлы, в каждом из которых содержится уникальная ассоциация химических элементов. Среди них выделены титан, ванадий, хром, никель, редкоземельные элементы и металлы платиновой группы с аномально





С помощью электротомографии на постоянном токе вскрыта причина периодического (подобно гейзеру) режима функционирования Большого кипящего котла под Северо-Восточным фумарольным полем вулкана Эбеко. Графическое представление информации в виде изоповерхностей УЭС отображает пространственную структуру парогазового резервуара котла и позволяет отчетливо увидеть зону конденсации парогазовой смеси в термальный раствор. Оказывается, этот котел содержит неглубокую объемистую ловушку, не имеющую прямого выхода на поверхность. В ней постепенно накапливается конденсат, который по достижении уровня горизонтального канала перекрывает его – и под давлением напора горячих газов фонтаном выплескивается наружу

Эбеко по частоте извержений является одним из самых активных вулканов Курильских островов. После извержений 1987 и 2010 гг. он привлекает пристальное внимание вулканологов в связи с его опасностью для г. Северо-Курильска, граница которого проходит всего в 6 км от активной воронки. На вулкане постоянно действуют фумаролы и горячие источники, в его кратерах периодически образуются кислые озера. Такой тип активности может быть обусловлен, с одной стороны, неглубоким расположением магматического очага, являющегося источником тепла и газообразного вещества, с другой – наличием горизонтов грунтовых вод

высокой концентрацией (Бортникова и др., 2009). Использование исключительно химико-аналитических методов не пролило свет на необычный состав термальных растворов.

С помощью ЧЭЗ удалось различить каналы вблизи поверхности (на глубине 5–8 м), по которым одновременно подводятся жидкофазные термальные растворы и газ. Оказалось, что потоки гидротермальных растворов не распределены равномерно по пространству под термальной площадкой, а сгруппированы зонально. При этом разнофазные потоки не перемешиваются, что и объясняет разнообразие термальных грязей.

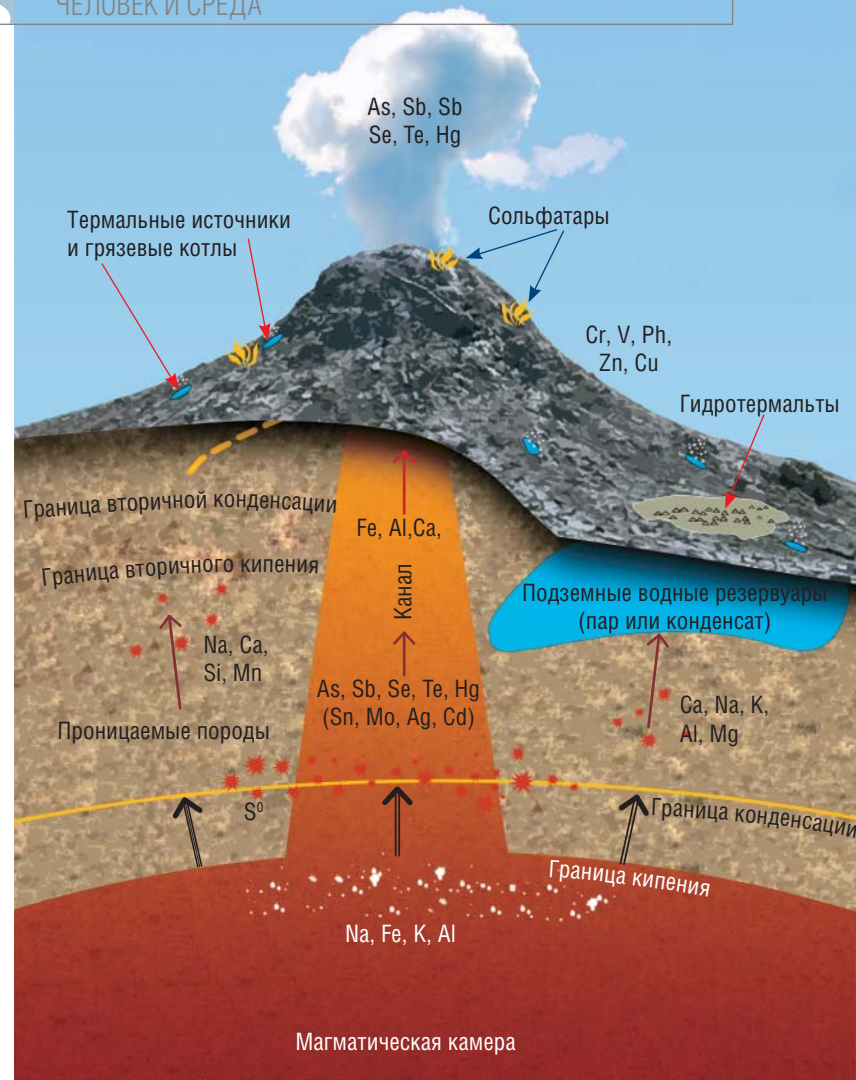
На том же Донном поле существуют и так называемые «рыжие водоемы» – гематитовые лужи, которые

содержат большое количество двухвалентного железа. До недавнего времени их контрастно отличающийся химический состав оставался необъясненным. ЧЭЗ показало, что они имеют хоть и небольшие, но вполне различимые каналы, подпитывающие эти термы.

На вулкане Эбеко гидротермальное отложение веществ глубинного происхождения идет в основном на Северо-Восточном фумарольном поле. На трехмерной электротомографической карте распределения УЭС наглядно интерпретируется наличие парогазовой зоны, которая ближе к поверхности переходит в зону высокоминерализованных растворов. В этой зоне из парогазового потока отделяются вещества, переходящие в водную фазу – так происходит эволюция последовательного формирования раствора.

Таким образом, неразрушающий контроль продемонстрировал для вулканологии великолепный результат при изучении подводных каналов активных гидротерм и подповерхностных фазовых барьеров.

К сожалению, параметры физико-химических трансформаций веществ пока не представляется возможным измерить экспериментально *in situ*, т. е. непосредственно в природных условиях. Но зная свойства каждого из этих веществ в отдельности, можно с определенной долей приближения предугадать, какие они будут претерпевать изменения. Такой умозрительный процесс называют физико-химическим моделированием.



С помощью программных комплексов «Селектор» и «Флюид», разработанных в Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск) и Институте геохимии СО РАН (Иркутск), выполнено физико-химическое моделирование миграции веществ в газо-гидротермальном потоке.

Сравнение результатов моделирования с гидрогеохимическими данными, полученными экспедицией СО РАН на вулканах Эбеко и Мутновский, позволило открыть закономерности, которые положены в основу концептуальной модели вулcano-гидротермальной системы

Основой (набором входящей информации) для моделирования являются данные полевых исследований.

Так, в результате физико-химического моделирования открыто несколько важных закономерностей, на основе которых сформулирована гипотеза о миграции химических элементов от магматической камеры до земной поверхности. Она положена в основу разработанной концептуальной схемы вулcano-гидротермальной системы.

Модель предполагает наличие неглубоко (менее 3 км) расположенной магматической камеры и хорошо проницаемого вертикального канала в толще горных пород, по которому горячие флюиды поднимаются к поверхности Земли.

Часть элементов, переносимых магматогенным флюидом, происходит из первичного расплава, другая часть выщелачивается (экстрагируется) из пород по пути следования. При встрече флюида с пластами подземных вод происходит остывание и разбавление термальных растворов, однако на химический «портрет» растворов это влияет несущественно – так следует из результатов моделирования.

Важнейший вклад в концентрирование растворов вносит эффект фазового разделения. Выяснено, что конденсация происходит в основном из-за остывания растворов по мере удаления от внутреннего источника тепла, а вскипание – вследствие спада давления при входе в менее плотный слой. При этом оба случая фазовых переходов способствуют обогащению жидкого раствора металлами, а с газом уносятся элементы, образующие летучие гидриды.

Вот так, в общих чертах, и формируются рудоносные флюиды, при благоприятных условиях способные образовывать рудные месторождения.

Безусловно, еще многие вопросы генезиса термальных растворов остаются нерешенными. В дальнейших исследованиях планируется изучить реальные фазовые барьеры (локализацию, физические и химические свойства, механизм воздействия на флюидный поток), а также определить условия, при которых происходит осаждение рудных компонентов.

Для решения поставленных задач создается более совершенная численная модель физико-химического взаимодействия флюида и породы, учитывающая возможность фазовых переходов и энергетику протекающих процессов.

Литература

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 408 с.

Бортникова С.Б., Гавриленко Г.М., Бессонова Е.П., Лапухов А.С. Гидрогеохимия термальных источников в Мутновский (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 6. С. 1–18

Балков Е.В., Эпов М.И., Манштейн А.К. Оценка глубинности наземного электромагнитного частотного зондирования // Геофизика. 2006. № 3. С. 41–44.

Эпов М.И. Из глубины сибирских руд... // Наука из первых рук, 2009. № 4(28), с. 60–73.

Бобачев А.А. и др. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 02. С. 14–17.

Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования «ЭМС» // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 6. С. 571–579.

Манштейн Ю.А. и др. Особенности строения проводящих каналов термальных источников вулкана Мутновский (Южная Камчатка) // Докл. РАН. 2008. Т. 423, № 3, С. 383–388.

Бессонова Е.П. и др. Физико-химическое моделирование гидротермального изменения андезитов вулкана Эбеко, Курильские о-ва // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 56–64.

Авторы благодарят коллектив Курило-Камчатской экспедиции ИНГГ и ИГМ СО РАН, а также коллег из Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-167.2010.5, интеграционного проекта СО и ДВО РАН № 96.

В публикации использованы фото к.г.-м.н. А.Я. Шевко (Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск)

