

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАЛЬДЕРЫ УЗОН НА КАМЧАТКЕ

Мороз Ю.Ф., Мороз Т. А., Логинов В.А.
Карпов Г.А., Николаева А. Г.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск- Камчатский.

Рассмотрены результаты электромагнитного зондирования кальдеры Узон. На основе анализа магнитотеллурических и магнитовариационных параметров определена методика интерпретации. Выполнена инверсия кривых МТЗ и МВЗ в рамках двумерной модели. Построены геоэлектрические разрезы кальдеры по двум ортогональным профилям. Выявлены аномалии повышенной электропроводности в осадочном чехле, которые приурочены к выходам геотермальных источников. Повышенная проводимость аномалий связывается с наличием высокоминерализованных гидротермальных растворов. В докальдерном комплексе пород выделена субвертикальная зона повышенной проводимости, связываемая с глубинным разломом, по которому глубинные флюиды поднимаются вверх в осадочный чехол. Предполагается, что здесь высокоминерализованные растворы разбавляются вадозными водами и поступают на дневную поверхность в виде бурлящих и кипящих источников. По удельному электрическому сопротивлению пород выполнена приближённая оценка пористости пород. На основе полученных данных предложена глубинная гидрогеологическая модель кальдеры.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, магнитовариационное зондирование, электропроводность, гидротермальные растворы, пористость, кальдера.

Кальдера Узон представляет собой кольцевую структуру, возникшую при обрушении кровли магматического очага вулкана после извержения больших объёмов пемзы и ингимбритов. Она характеризуется мощным проявлением геотермальной активности. По разнообразию видов термопроявлений Узонское термальное поле является уникальным и не имеет себе равных на Камчатке. Изучение глубинного строения этого района представляет большой научный и практический интерес. Здесь в 2012 году выполнены магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования с целью изучения глубинного строения кальдеры (рис. 1).

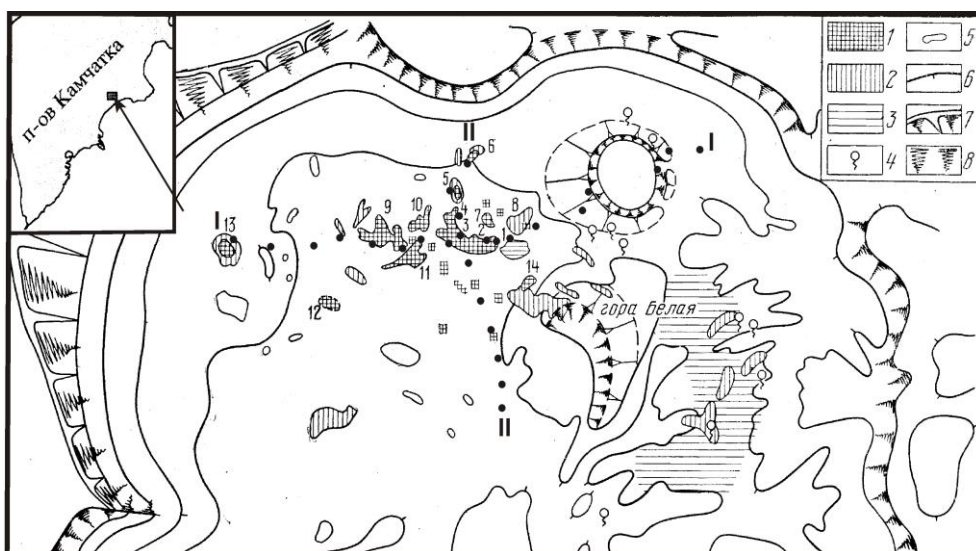


Рис.1. Схема термопроявлений кальдеры [1]

1 - участки проявления современной гидротермальной деятельности; 2 - 3 - участки гидротермального изменения пород; 4 - холодные грунтовые источники ; 5 - пресные озера; 6-горизонталы (условные) через 100м; 7 - скальные обрывы сопки Узон; 8 - обрывы внутренних бортов кальдеры и мелких вулканических аппаратов. Цифры на рисунке (названия термальных участков): 1, 2, 3 - I, II, III участки Восточного поля; 4, 5, 6 - площадки Цепочка, Оранжевая, Северная; 7, 8-

площадки восьмерка и Крайняя; 9 - участок оз.Фумарольного; 10, 11 – участки Теплых болот и Южный; 12 - участок Береговой; 13 - Западное поле; 14 - участок горы Белой. Черными кружками изображены пункты зондирований.

Методика работ и анализ магнитотеллурических данных

Геоэлектрический разрез изучен по двум ортогональным профилям, пересекающим кальдеру в субширотном и субмеридиональном направлениях. Наблюдения магнитотеллурического поля выполнены с помощью аппаратуры MTU-5A Канадской фирмы «Phoenix Geophysics Ltd». Регистрация магнитотеллурического поля осуществлялась в диапазоне звуковых частот от 10000 до десятых долей Гц. Шаг наблюдений 200 – 500 м. Азимут направлений горизонтальных составляющих поля 30 и 120⁰. Длина электрических диполей 100м. В результате обработки получены тензоры импеданса и магнитного типпера в диапазоне периодов от 0.0001 с до 1-10 с. Важное внимание уделялось редакции данных по устранению влияния «отскоков» значений магнитотеллурических параметров, связанных с промышленными, ветровыми помехами и влиянием гроз. Следует отметить, что на большинстве кривых МТЗ и МВЗ в диапазоне периодов 0.0004 – 0.0009 с проявляются отскоки МТ - параметров, достигающих одного-двух и более порядков. Однозначно природу этих «отскоков» установить не удалось. Анализ показывает, что они сильно выражены на пунктах зондирований, расположенных в районе «бурлящих», «кипящих» гидротермальных источников. Поэтому, предполагается, что аномальные эффекты могут быть вызваны электрокинетическими явлениями. Данное предположение требует проверки с помощью специальных более глубоких исследований в районе действия активных гидротермальных источников.

Анализ магнитотеллурических параметров свидетельствует, что в высокочастотной области геоэлектрическую модель осадочного чехла центральной части кальдеры в первом приближении можно аппроксимировать в виде одномерной модели. В краевых частях кальдеры параметр неоднородности N (амплитудный) - параметр Бара возрастает до 0.5 и более, что свидетельствует об увеличении геоэлектрической неоднородности осадочного чехла. Также следует отметить возрастание параметра N до 0.6 и более на большинстве пунктов МТЗ в диапазоне периодов 0.5 – 5 с. Это возрастание параметров N связано с увеличением геоэлектрической неоднородности докальдерного комплекса пород. В большей мере неоднородность выражена в районе центральной части депрессии. Параметр асимметрии Свифта свидетельствует о том, что на длинных периодах геоэлектрические неоднородности можно аппроксимировать в качестве двумерных, что связано с глубинным субширотном разломом, пересекающим кальдеру.

Представление о характере геоэлектрического разреза кальдеры дают кривые кажущегося электрического сопротивления и фазовые кривые импеданса. Они получены по направлениям близким к простиранию и вкрест простирания широтного разлома. Данные направления отвечают главным направлениям тензора импеданса. В центральной части кальдеры кривые ρ_{xy} и ρ_{yx} в высокочастотной области практически совпадают. На них хорошо выражен минимум, связанный с осадочным чехлом. Кажущиеся сопротивления кривых в минимуме около 1 Ом·м. В области низких частот кривые ρ_{xy} и ρ_{yx} расходятся по форме в виде «ножниц». Этот эффект расхождения проявляется на фазовых кривых с более коротких периодов, чем на амплитудных кривых. Данное преимущество фазовых кривых импеданса даёт возможность «увидеть» в ограниченном длиннопериодном диапазоне периодов геоэлектрическую неоднородность в докальдерном комплексе пород. Выполненный анализ свидетельствует, что в целом геоэлектрический разрез кальдеры в рассматриваемом диапазоне частот можно аппроксимировать в виде двумерной модели. Поэтому, для решения обратной задачи целесообразно использовать двумерное численное моделирование магнитотеллурического поля.

Рассмотрим магнитовариационные данные. Вещественные и мнимые типперы (индукционные стрелки) получены в диапазоне периодов от 0.00001 до 2 – 3 секунд. С увеличением периода типперы слабее реагируют на влияние приповерхностных локальных геоэлектрических неоднородностей и в большей мере отражают особенности распределений глубинной структуры электропроводности. На большинстве пунктов вещественные индукционные стрелки превышают мнимые. Величина вещественных стрелок меняется от первых сотых долей до 0.3. По ориентации вещественных стрелок можно судить о наличии глубинных проводящих зон. В северной части профиля II-II вещественные индукционные стрелки ориентированы на северо-восток, а в южной части на юго-восток. Такое поведение стрелок свидетельствует в пользу существования

субширотного разлома вблизи центральной части профиля I. В районе пересечения профилей I-I и II-II «веерообразное» направление вещественных стрелок также указывает на аномалию повышенной электропроводности. Таким образом, магнитные типперы отражают наличие проводящей зоны в районе указанного профиля.

Результаты интерпретации МТЗ и МВЗ

Инверсия кривых МТЗ и МВЗ выполнена с использованием программы REBOCC. В результате интерпретации получены геоэлектрические разрезы по профилям I – I и II – II. На рис.2 представлен геоэлектрический разрез по профилю I-I. Удельное электрическое сопротивление пород меняется от первых сотен до десятых долей Ом·м. Низкие значения сопротивлений отмечаются в районе термальных полей активной гидротермальной деятельности. Характерно, что в этих районах аномалии повышенной электропроводности приближены к дневной поверхности. Важно отметить, что в районе Восточного термального поля отмечается уменьшение мощности проводящего осадочного чехла до первых сотен метров, при этом удельное электрическое сопротивление уменьшается до десятых долей Ом·м. Здесь отмечается большое количество «бурлящих» и «кипящих» гидротермальных источников, выходящих на дневную поверхность. Минерализация гидротерм достигает 4 – 5 г/л. Повышенную электропроводность посткальдерных образований, сложенных преимущественно озёрными и пирокластическими рыхлыми отложениями, можно объяснить высокой проницаемостью и насыщенностью их высокоминерализованными растворами. За пределами термальных полей отмечается погружение слоя повышенной электропроводности в осадочной толще и увеличение его удельного электрического сопротивления.

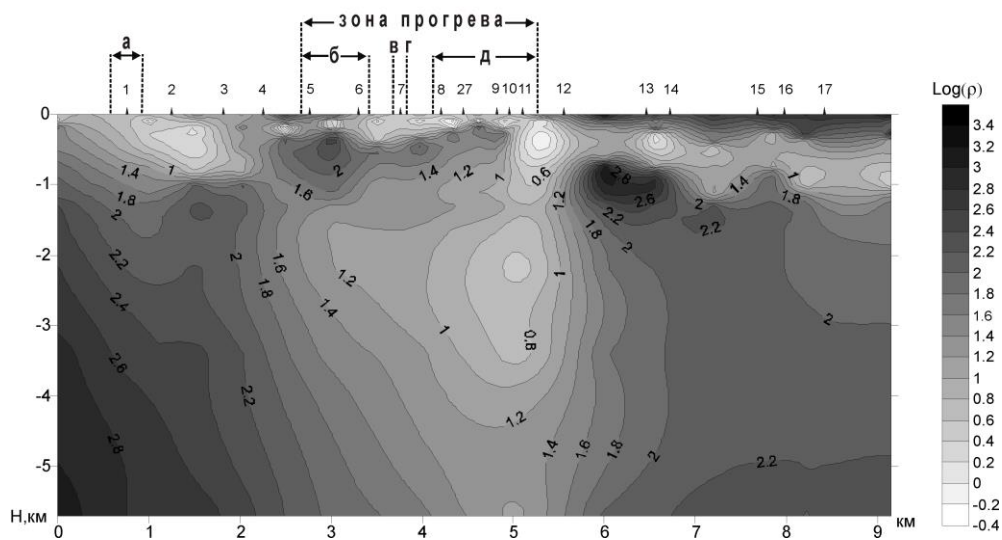


Рис.2. Геоэлектрический разрез по профилю I-I

а - Западное термальное поле, б - термальное поле оз. Фумарольное, в - источник Строматолитовый, г - источник углекислый, д – Восточное термальное поле

Наличие высокоминерализованных растворов в осадочном слое, по-видимому, определяет его повышенную электропроводность. Попытаемся оценить, в какой мере высокоминерализованные растворы оказывают влияние на удельное электрическое сопротивление осадочного чехла. Минерализация вод в гидротермальных источниках в области разгрузки составляет 1.5 – 4.5 г / л. При удалении от очагов разгрузки минерализация вод уменьшается до десятых долей г / л. Воды с минерализацией в первые единицы г/л характеризуются удельным электрическим сопротивлением в первые единицы Ом·м. При повышении температуры раствора до 100° С его удельное электрическое сопротивление возрастает почти в 2 раза. Наличие в породах минерализованного раствора в связанном состоянии приводит к уменьшению их удельного электрического сопротивления в десятки и сотни раз. Попытаемся оценить пористость осадочного слоя. Для этого воспользуемся зависимостью Арчи для двухфазной системы:

$\rho = 3 \rho_{\phi} / 2K$, где ρ – удельное электрическое сопротивление осадочного слоя, ρ_{ϕ} . удельное электрическое сопротивление порового флюида, K – пористость. В этой формуле предусмотрена связанность каналов. Гидротермы при выходе на дневную поверхность имеют температуры 60 - 90° С. При этих температурах удельное электрическое сопротивление электролита уменьшается примерно в два раза по сравнению с сопротивлением электролита при температуре 18° С.

Рассмотрим вариант со средней минерализацией гидротермальных источников равным 3 г/л. При такой минерализации и температуре 60 – 90° удельное электрическое сопротивление раствора будет около 10 Ом·м. Средние значения удельного электрического сопротивления осадочного слоя составляют первые единицы Ом·м. Из приведённой формулы следует, что пористость пород осадочной толщи в районе выхода термальных источников может быть до 60 %. За пределами выхода термальных источников удельное электрическое сопротивление осадков чехла возрастает до 10 - 20 Ом·м. Следовательно, пористость пород уменьшается примерно до 15 - 30 %.

Рассмотрим электропроводность пород подстилающих осадочную толщу. Фундамент сложен основными и кислыми породами, представленными преимущественно лавами с ограниченным содержанием пирокластики. Удельное электрическое сопротивление данных пород составляет первые сотни Ом·м. Наиболее низкие сопротивления в фундаменте отмечаются в средней части кальдеры под Восточным термальным полем (рис 2). Повышенную электропроводность пород в подстилающем комплексе можно связать с глубинным разломом, в котором породы насыщены высокоминерализованными растворами. Проникновение растворов в разлом может быть обусловлено увеличенной пористостью пород. По приближенным оценкам пористость пород по формуле Арчи составляет десятые доли - первые проценты.

Обсуждение полученных результатов

Геоэлектрические разрезы с привлечением других геолого-геофизических данных дают представление о глубинном строении кальдеры. Образование кальдеры связывается с существованием корового магматического очага. Предполагается, что коровый магматический очаг существовал с дочетвертичного времени. На это указывают находки в районе кальдеры кислых пород плиоценового возраста. Электромагнитные данные свидетельствуют, что коровый очаг, содержащий породы в частично расплавленном состоянии находится глубже 5 км. По структурным данным в период мощной эксплозивной деятельности, когда сформировалась толща узонских ингимбритов, верхняя кромка магматического очага возможно находилась на глубине 7 - 8 км, а диаметр его составлял примерно 10 км. По данным МТЗ и МВЗ фундамент, подстилающий осадочный чехол, содержит зону повышенной электропроводности, связываемую с наличием гидротермальных растворов. Ширина зоны около 2 км. По-видимому, она представляет собой гидротермальный резервуар, имеющий связь с осадочным чехлом. Не исключено, что данная зона повышенной электропроводности отражает бывший магматический канал, питавший вулкан Узон. Она характеризуется повышенной пористостью пород и является в настоящее время каналом, по которому гидротермальные растворы из области остывающего корового магматического очага и более глубинных зон поступают в осадочный чехол, выполненный озерными и пирокластическими отложениями с высокой пористостью. Гидротермальные растворы, поступившие из глубинных частей разреза, распространяются в осадочном чехле, и местами выходят на поверхность в виде бурлящих и кипящих источников. Здесь отмечается высокая минерализация растворов (до 4.5 г/л) и повышенная температура (до 100° С) растворов. Наряду с этим гидротермальные растворы перемешиваются в осадочном чехле с вадозными водами, которыми насыщены рыхлые породы посткальдерного комплекса. Поэтому в других местах выходы гидротермальных источников имеют меньшую минерализацию и пониженную температуру. Важно подчеркнуть, что процессы смешивания глубинных и метеорных вод, по-видимому, протекают в основном в осадочном чехле с повышенной пористостью пород. Проникновение метеорных вод в породы основания скорее всего имеет подчинённый характер.

Важную роль в геотермальной активности кальдеры играют глубинные флюиды, выносящие тепло и минеральные соли. О поступлении глубинных флюидов свидетельствует присутствие в их составе спонтанных газов He, H₂, CO₂, а в водных растворах повышенные содержания химических элементов Cl, B, As, Sb, Hg и др. Следует отметить, что в области проводящего канала фиксируются проявления углеводородов. Это может указывать на вероятность неорганического происхождения углеводородов.

1. Пилипенко Г.Ф. Современная гидротермальная деятельность в кальдере Узон // Вулканизм гидротермальных процессов и рудообразование. М.: Изд-во Недра, 1974. С. 72-83