



УДК 550.837

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

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: moroz@kscnet.ru*

Строение кальдеры Узон на Камчатке по геофизическим данным

Рассмотрены результаты магнитотеллурического зондирования кальдеры Узон. На основе анализа магнитотеллурических параметров определена методика интерпретации кривых МТЗ. Построены геоэлектрические разрезы посткальдерного комплекса 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. По удельному электрическому сопротивлению пород выполнена приближённая оценка пористости пород, которая достигает 60% в аномальных зонах. В докальдерном комплексе пород выделена вертикальная 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.

Введение

Кальдера Узон, расположенная на восточном побережье Камчатки, представляет собой кольцевую структуру, возникшую при обрушении кровли магматического очага вулкана после извержения больших объёмов пемзы и ингимбритов (рис. 1). 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 г. выполнены магнитотеллурические зондирования с целью изучения глубинного строения кальдеры. Методике исследований и обсуждению полученных результатов посвящена настоящая статья.

Краткая геолого-геофизическая характеристика района

Сведения по геологии, тектонике, гидротермальной активности и геофизическим данным приведены из работ [1, 2, 4, 7–9]. Кальдера Узон входит в состав Узонско-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии, представляющей собой овальную котловину размером 15×7,5 км. Депрессия выполнена на верхнеплиоценовыми — нижнечетвертичными вулканогенными толщами, на которых проявились более молодые вулканы. Длинная ось котловины ориентирована на северо-запад. Кальдера Узон занимает западную часть депрессии и представляет собой впадину овальной формы размером 7×10 км с плоским заболоченным дном.

В строении кальдеры выделяются два комплекса пород: докальдерный и посткальдерный. Докальдерный комплекс пород образует фундамент, на котором залегают образования посткальдерного комплекса. Фундамент сложен основными и кислыми породами плейстоценового возраста. Разрез пород однотипный и представлен преимущественно лавами с ограниченным содержанием пирокластике. Посткальдерный комплекс сложен отложениями, образованными после главной фазы выбросов пирокластического материала, выраженных в виде ингимбритовых покровов. Главную массу отложенный комплекса составляют озёрные осадки. Также проявились экструзивные купола. Базальтовый вулканизм и взрывные отложения выражены незначительно.

В тектоническом плане Узонско-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия представляет собой опущенный блок северо-западного простирания — кальдеру обрушения, ограниченную кольцевым разломом. Разлом фиксируется в виде уступа амплитудой 300–400 м. Дно кальдеры Узон намного ниже борта депрессии. По гравиметрическим данным в депрессии выделяется ряд разновысоких блоков фундамента [7]. По зонам повышенных градиентов поля силы тяжести предполагаются разломы широтного и северо-западных простираний. Северо-западная часть кальдеры Узон осложняется более молодой воронкой взрыва размером 4–5 км. Она выполнена молодыми отложениями Узонского озера. Воронка выражена гравитационным минимумом. Он имеет почти изометричную в плане форму и значительную амплитуду. Минимум связывается с отложениями пониженной плотности мощностью до 1 км.

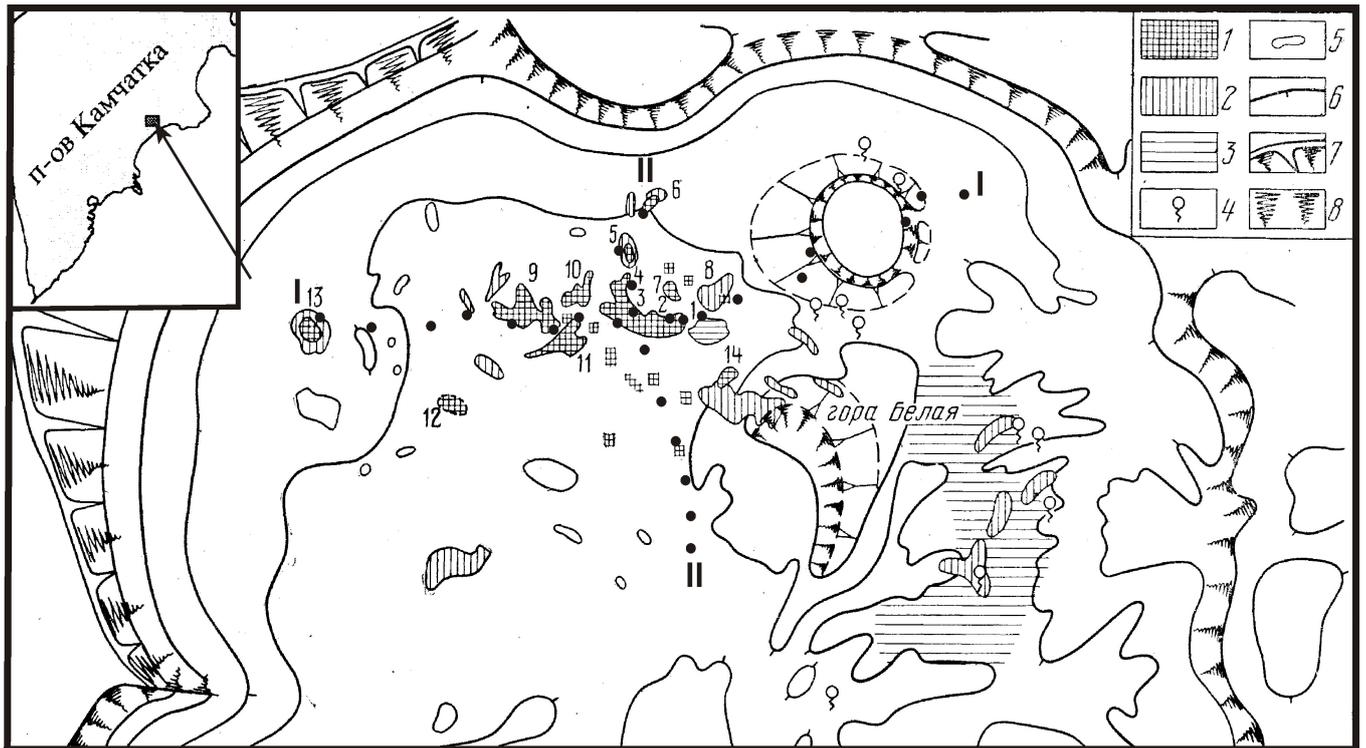


Рис. 1. Схема термопроявлений кальдеры Узон [9]. 1 — участки проявления современной гидротермальной деятельности; 2, 3 — участки гидротермального изменения пород; 4 — холодные источники; 5 — пресные озёра; 6 — горизонталы через 100 м; 7 — скальные обрывы сопки Узон; 8 — обрывы внутренних склонов борта кальдеры и мелких вулканических аппаратов. Цифры на рисунке — названия геотермальных участков: 1, 2, 3 — I, II, III участки Восточного поля; 4, 5, 6 — площадки Восмёрка и Крайняя; 9 — участок оз. Фумарольного; 10 и 11 — участки Тёплых болот и Южный; 12 — участок Береговой; 13 — Западное поле; 14 — участок горы Белой. Чёрными кружками изображены пункты МТЗ по профилям I-I и II-II.

Современная геотермальная активность в кальдере Узон приурочена к зоне широтного разлома, контролирующего гидротермально-изменённые породы. Как уже было отмечено, термальные участки Узона находятся в пределах наиболее молодой наложенной воронки взрыва. Здесь сосредоточен основной подток тепла. Высокая проницаемость осадочных пород создаёт условия для поступления терм на поверхность. Они проявляются множеством бурлящих воронок, озёр и кипящих грифонов, многочисленными грязевыми котлами и вулканчиками, прогретыми площадками с рассредоточенными выходами парагазовых струй. Температура источников 45–96° С, максимальная температура газопаровых струй 102° С. Общая минерализация горячих источников меняется от 0,5 до 5 г/л. Источники, в большинстве случаев, имеют пульсирующий режим излива. Иногда он переходит в слабый гейзерный.

Методика наблюдений и обработки данных

Геоэлектрический разрез изучен по двум ортогональным профилям, пересекающим депрессию в субширотном и субмеридиональном направлениях (рис. 1). Наблюдения магнитотеллурического поля выполнены с помощью аппаратуры MTU-5A Канадской фирмы «Phoenix Geophysics Ltd». Регистрация магнитотеллурического поля осуществлялась в диа-

пазоне звуковых частот от 10 000 Гц до десятых долей Гц. Шаг наблюдений 200–500 м (рис. 2). Азимут направлений горизонтальных составляющих поля 30 и 120°. Длина электрических диполей 100 м. Горизонтальные магнитные датчики укладывались в ямы глубиной около 30 см и сверху присыпались землёй. Для установки вертикального датчика магнитного поля использовался штатив.

Обработка МТ-данных выполнена с помощью специальных программ. В результате обработки получены тензоры импеданса и магнитного типпера в диапазоне периодов 0,0001–10 сек. Большое внимание уделялось редакции результатов 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 сек проявляются «отскоки» МТ — параметров, достигающие одного-двух и более порядков. Однозначно природу этих «отскоков» установить не удалось. Анализ показывает, что они сильно выражены на пунктах зондирования, расположенных в районе «бурлящих», «кипящих» гидротермальных источников. Предполагается, что аномальные эффекты могут быть вызваны электрокинетическими явлениями. Данное предположение требует проверки с помощью спе-

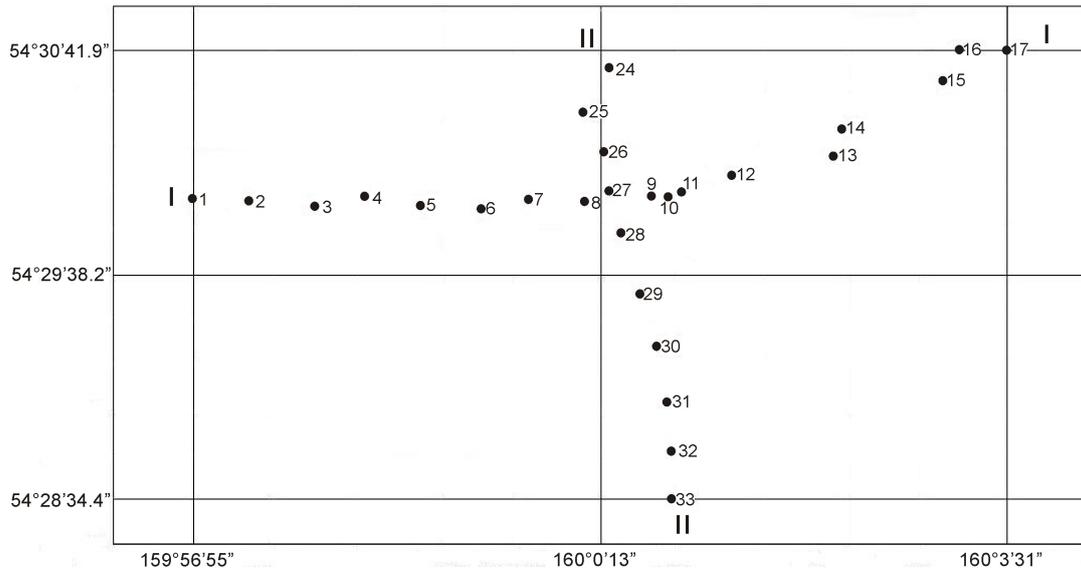


Рис. 2. Схема расположения пунктов МТЗ по профилям I – I – II – II (см. рис. 1). Цифрами обозначены номера МТЗ.

циальных более глубоких исследований в районе действия активных гидротермальных источников.

Интерпретация магнитотеллурических зондирований

Вариации магнитотеллурического поля содержат информацию об электропроводности геологической среды. В методе МТЗ для получения этой информации используется соотношение между горизонтальными векторами электрического и магнитного полей на земной поверхности [3]:

$$\mathbf{E}_{\text{гор.}} = [\mathbf{Z}]\mathbf{H}_{\text{гор.}},$$

где

$$[\mathbf{Z}] = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix},$$

или в развёрнутом виде:

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y, \\ E_y &= Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y, \end{aligned}$$

где $[\mathbf{Z}]$ — тензор импеданса: Z_{xx} , Z_{yx} , Z_{xy} , Z_{yy} — комплексные компоненты тензора импеданса, зависящие от частоты, распределения удельных электрических сопротивлений в Земле и ориентации координатных осей.

Тензор импеданса даёт возможность оценить характер геоэлектрической неоднородности среды. Полярные диаграммы основного импеданса (амплитудного) в средней части кальдеры в диапазоне периодов 0,0009–0,5 сек, характеризующего осадочный чехол, имеют вид окружности или эллипса со слабым сжатием (0,8–0,9). При этом, отношение дополнительных и основных импедансов по направлению осей геоэлектрической симметрии среды составляет десятые и сотые доли. Параметр неоднородности

N (амплитудный) — параметр Бара [10] на указанных периодах имеет значения сотые — первые десятые доли. Это даёт возможность геоэлектрическую модель осадочного чехла в первом приближении аппроксимировать в виде одномерной модели. В краевых частях кальдеры параметр N 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 сек. Это возрастание значения параметра N связано с увеличением геоэлектрической неоднородности докальдерного комплекса пород. В большей мере неоднородность выражена в районе центральной части депрессии. Параметр асимметрии Свифта [11] свидетельствует о том, что на длинных периодах геоэлектрические неоднородности можно считать двумерными, что связано с глубинным субширотным 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 в крест простирания широтного разлома. Данные направления отвечают главным направлениям тензора импеданса. Кривые МТЗ, ориентированные по простиранию и вкрест простирания разлома, обозначены — xy и yx , соответственно. Форма кривых МТЗ отвечает определённому типу геоэлектрического разреза. На рис. 3 и 4 приведены характерные кривые МТЗ. В центральной части кальдеры кривые ρ_{xy} и ρ_{yx} в высокочастотной области практически совпадают (МТЗ 5,8,11). На них хорошо выражен минимум, связанный с осадочным чехлом. Кажущиеся сопротивления кривых в минимуме около 1 Ом·м. В области низких частот кривые

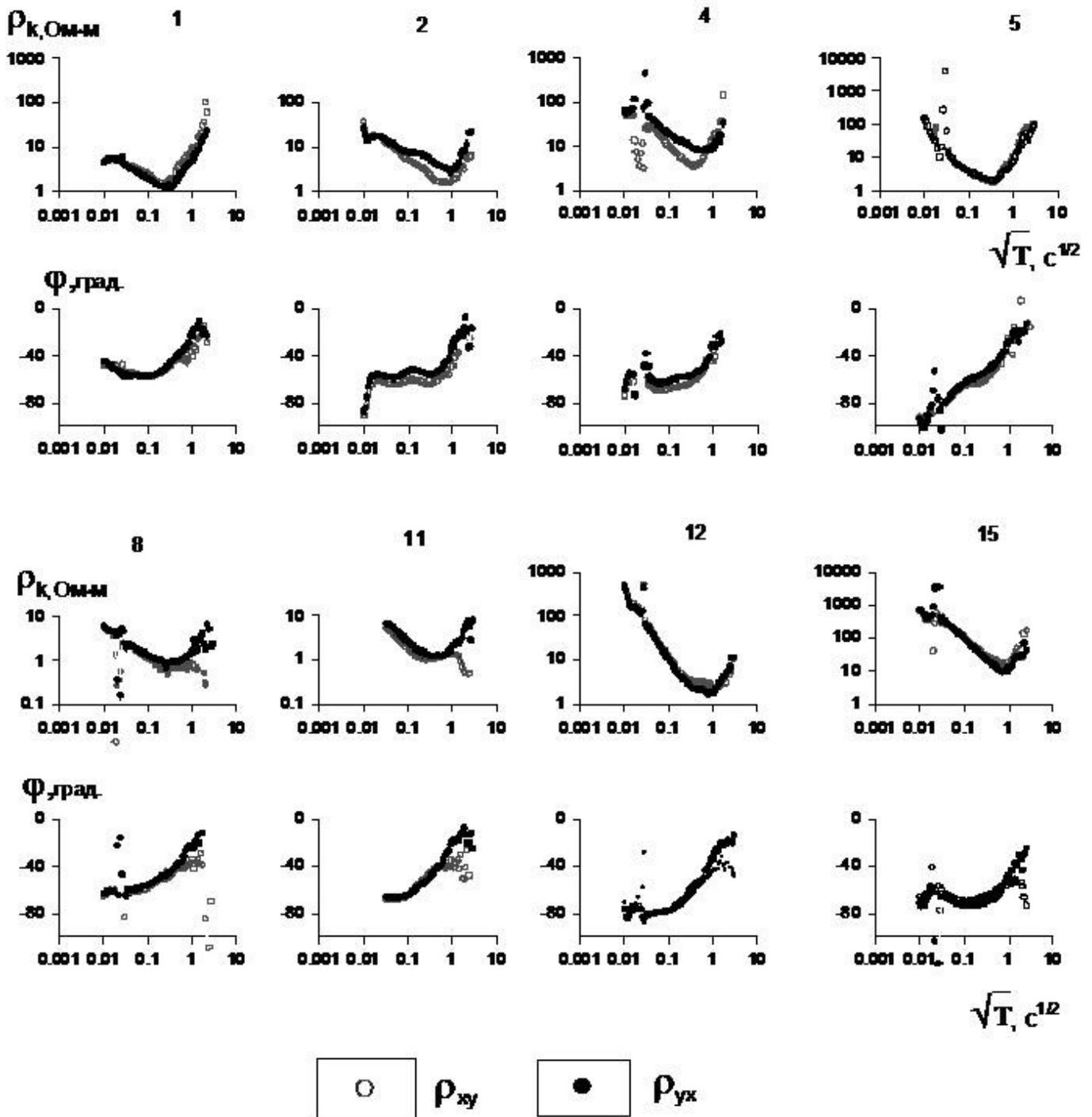


Рис. 3. Характерные кривые МТЗ по профилю I – I. Цифрами обозначены номера кривых МТЗ (см. рис. 2).

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 геоэлектрическую неоднородность в докальдерном комплексе пород. В восточной части профиля I кривые (МТЗ 12, 15) имеют более протяжённую левую нисходящую ветвь, свидетельствующую об увеличенной

мощности высокоомных образований, перекрывающих проводящий осадочный чехол. На этом профиле, в восточной краевой части кальдеры, кажущееся электрическое сопротивление в минимуме кривой возрастает почти на порядок (МТЗ 15).

В южной части профиля II кривые МТЗ имеют более сложную форму. Здесь в области нисходящей левой ветви кривой кажущегося электрического сопротивления проявляется дополнительный максимум, связанный с наличием высокоомного слоя. Зна-

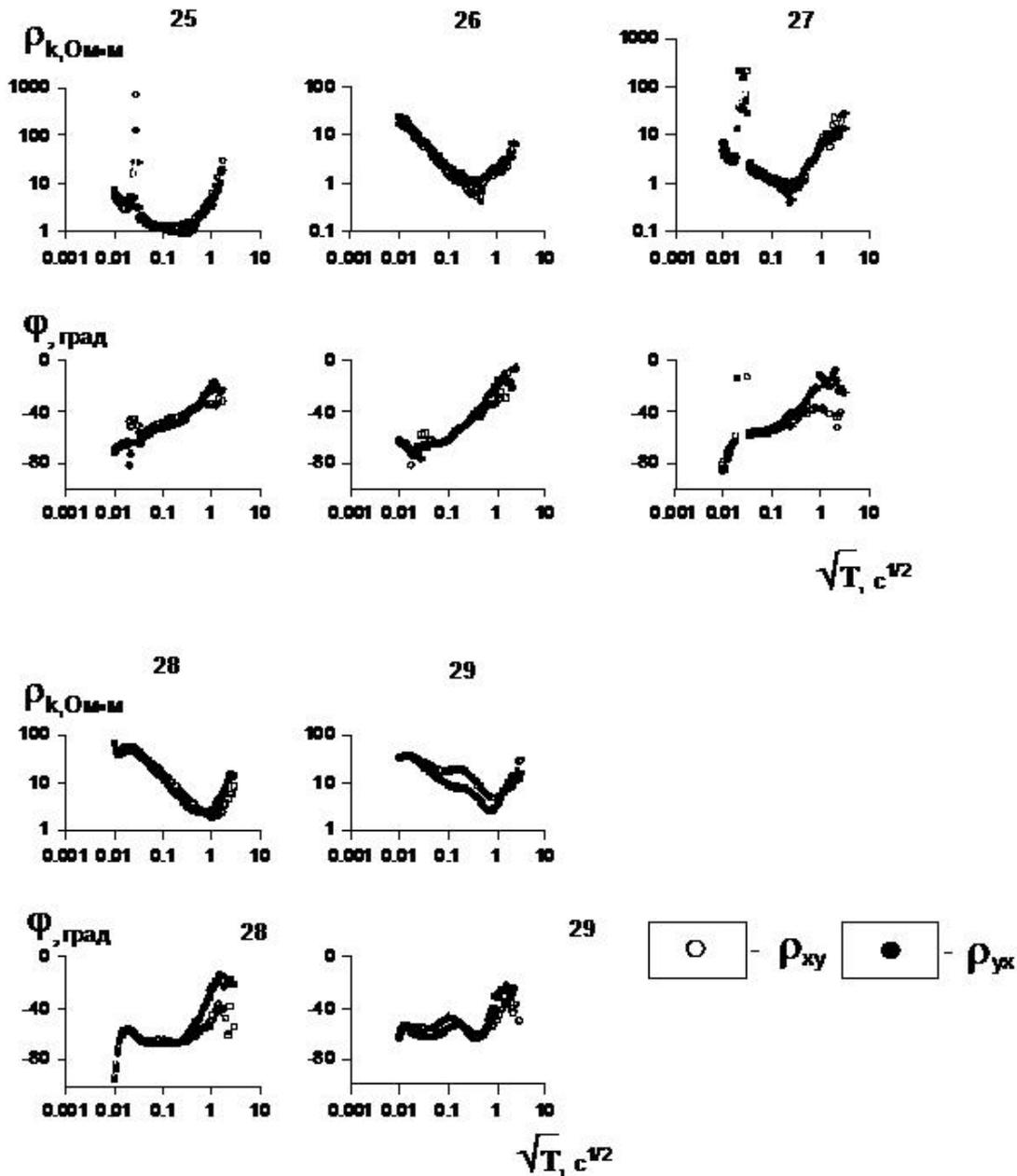


Рис. 4. Характерные кривые МТЗ по профилю II – II. Цифрами обозначены номера кривых МТЗ (см. рис. 2).

чения кажущегося электрического сопротивления в минимуме возрастают в несколько раз, по сравнению с северной частью профиля. Кривые МТЗ имеют более резкий минимум, связанный с осадочным чехлом. Значения ρ_{xy} и ρ_{yx} в минимуме заметно расходятся по уровню сопротивлений (МТЗ 29,31).

Выполненный анализ говорит о том, что осадочный чехол средней части кальдеры можно аппроксимировать с помощью одномерной модели, а глубинную структуру кальдеры — двумерной геоэлектрической моделью. Поэтому, на данном этапе исследований, геоэлектрический разрез осадочного чехла кальдеры изучен в рамках одномерной модели. Приближённое представление о структуре электропроводности основания получено в рамках

двумерной модели. Оно основано на эффекте расхождений кривых МТЗ по главным направлениям в низкочастотной области.

По данным одномерной интерпретации кривых МТЗ построены геоэлектрические разрезы осадочного чехла по профилям I-I и II-II (рис. 5 и 6). Удельное электрическое сопротивление пород чехла меняется от первых десятков до первых единиц Ом·м. Мощность осадочного чехла с удельным электрическим сопротивлением от 20 до 1 Ом·м меняется от 200 м до 600 м. Низкие значения удельного электрического сопротивления в первые единицы Ом·м отмечаются в районе термальных полей: Западное, Восточное и оз. Фумарольное. Характерно, что в районах термальных полей аномалии по-

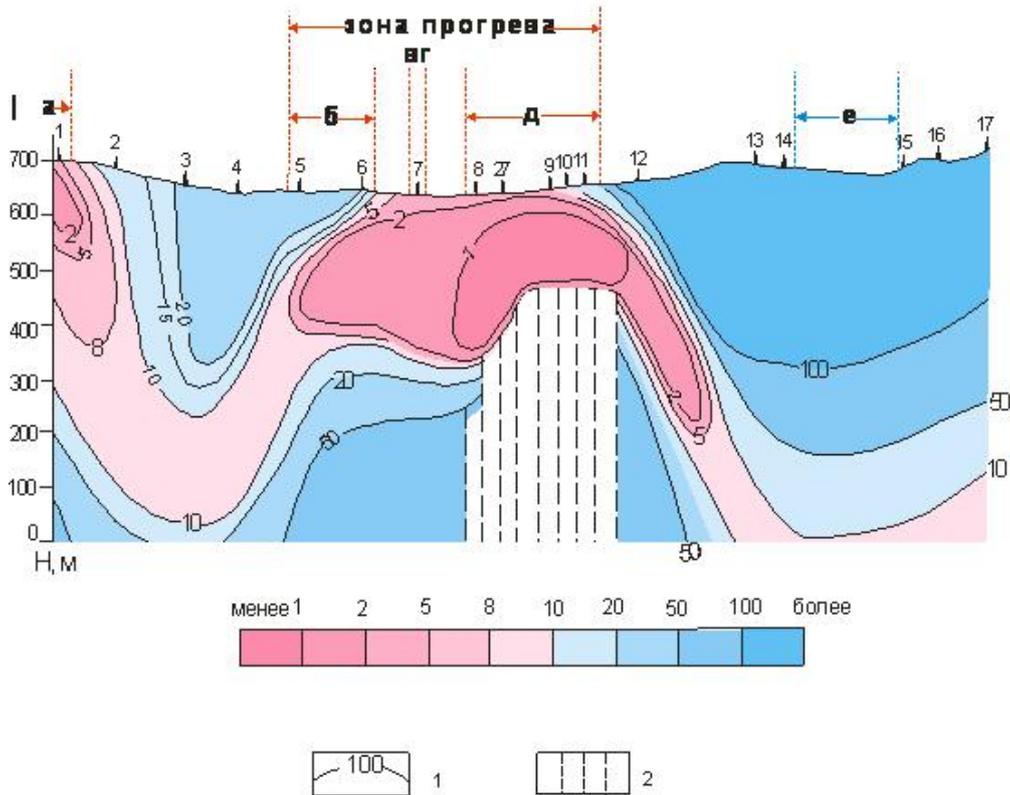


Рис. 5. Геоэлектрический разрез кальдеры по профилю I — I. 1. Изолинии в Ом·м; 2 — зона разлома; а — Западное термальное поле, б — термальное поле оз. Фумарольное, в — источник Строматолитовый, г — источник Углекислый, д — Восточное термальное поле.

вышенной электропроводности приближены к дневной поверхности. В районе Восточного термального поля отмечается уменьшение мощности проводящего осадочного чехла до первых сотен метров. При этом удельное электрическое сопротивление толщи уменьшается до 1 Ом·м. В районе Восточного термального поля докальдерный комплекс пород содержит субвертикальную проводящую зону. На дневной поверхности здесь проявляется большое количество «бурлящих» и «кипящих» гидротермальных источников.

Обсуждение полученных результатов

Электропроводность горных пород зависит от минералогического состава, структуры, степени влагонасыщенности и термодинамических условий. Рассмотрим посткальдерный комплекс, сложенный рыхлыми озёрными и пирокластическими образованиями. Удельное электрическое сопротивление осадочного слоя меняется от первых единиц до первых десятков Ом·м. Самые низкие сопротивления отмечаются в районе выхода гидротермальных источников. Наличие высокоминерализованных растворов в осадочном слое, по-видимому, определяет его повышенную электропроводность. Минерализация вод в гидротермальных источниках в области разгрузки составляет 1,5–4,5 г/л [9]. При удалении от очагов разгрузки минерализация вод уменьшается до десятых долей г/л. Воды с минерализацией в первые

единицы г/л при температуре 18° С характеризуются удельным электрическим сопротивлением в первые единицы Ом·м [6]. 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 [5].

Попытаемся оценить пористость осадочного слоя. Для этого воспользуемся зависимостью Арчи для двухфазной системы:

$$\rho = 3\rho_f/2\kappa,$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление осадочного слоя, ρ_f — удельное электрическое сопротивление порового флюида, κ — пористость.

В этой формуле предусмотрена связанность каналов. Гидротермы при выходе на дневную поверхность имеют температуры 60–90° С [8, 9]. 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 3 г/л. При такой минерализации и температуре 60–90° С удельное электрическое сопротивление раствора будет около

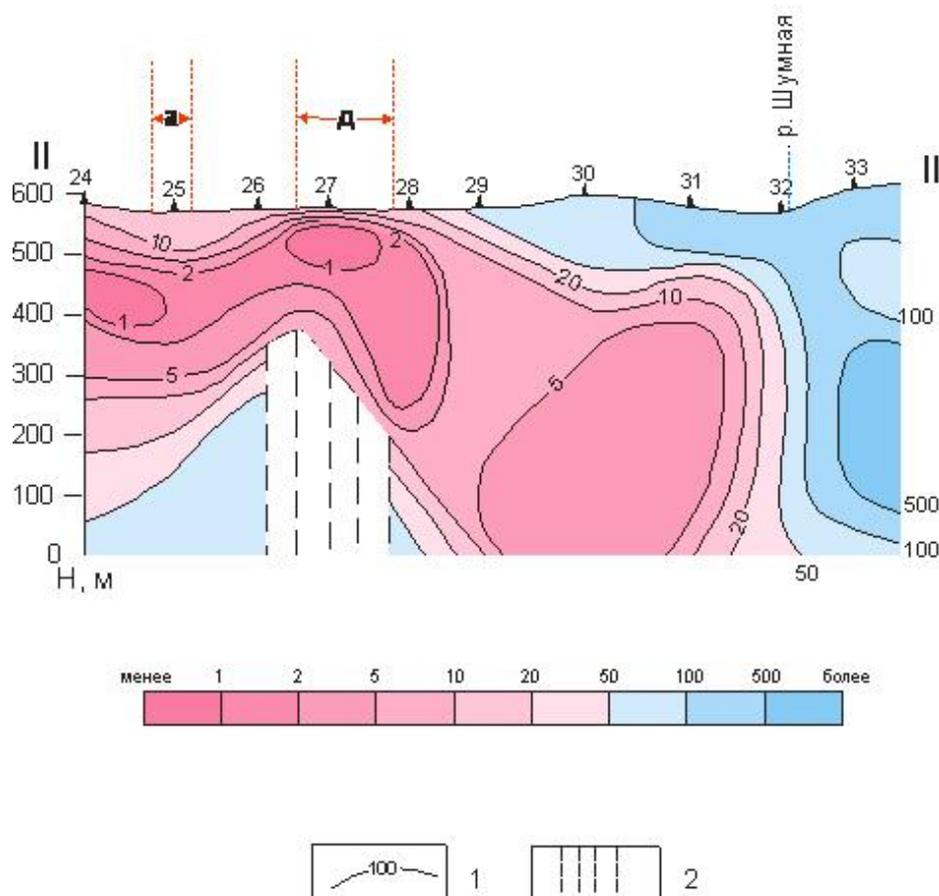


Рис. 6. Геоэлектрический разрез кальдеры по профилю II – II – изолинии в Ом·м; 2 – зона разлома; термальные поля: а – Оранжевое поле, д – Восточное поле.

ло 10 Ом·м. Минимальное значение удельного электрического сопротивления осадочного слоя составляет 1 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%.

Фундамент, подстилающий осадочный чехол, содержит вертикальную зону повышенной электропроводности, связываемую с наличием гидротермальных растворов. Не исключено, что данная зона отражает бывший магматический канал, питавший вулкан Узон. Канал характеризуется повышенной пористостью. По нему гидротермальные растворы из области остывающего корового магматического очага и более глубинных зон поступают в осадочный чехол, выполненный озёрными 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 (до 4,5 г/л) и повышенная температура растворов (до 100° С). На-

ряду с этим, гидротермальные растворы перемещаются 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 значительной мере в осадочном чехле с повышенной пористостью пород.

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.

Выводы

Анализ магнитотеллурических параметров свидетельствует, что осадочный чехол центральной части кальдеры, в первом приближении, может быть

представлен в виде одномерной геоэлектрической модели. Структура электропроводности основания модели может быть аппроксимирована двумерной моделью.

По данным одномерной интерпретации МТЗ построены геоэлектрические разрезы осадочного чехла кальдеры. Удельное электрическое сопротивление пород меняется от первых десятков до первых единиц Ом·м. Оно, в основном, зависит от минерализации вод и степени насыщенности ими пород осадочного чехла. Низкие значения удельного электрического сопротивления отмечаются в центральной части кальдеры в районе термальных полей, где минерализация гидротерм достигает 5 г/л. Характерно, что в районе термальных полей аномалии повышенной электропроводности приближены к дневной поверхности.

По удельному электрическому сопротивлению выполнена оценка пористости пород осадочного чехла. Она, в районах с повышенной электропроводностью пород, приуроченных к термальным полям, достигает 60%. По направлению к краевым частям кальдеры, электропроводность пород уменьшается в несколько раз, и пористость пород, соответственно, уменьшается до 15–30% и менее.

В основании осадочного чехла (докальдерном комплексе пород) выявлена субвертикальная проводящая зона. Она приурочена к Восточному термальному полю, где проявляется большое число гидротермальных источников. Проводящая зона характеризуется высокой пористостью пород. Повышенная проводимость зоны связана с наличием высокоминерализованных растворов, насыщающих породы. Данная проводящая зона, по-видимому, представляет собой канал, по которому глубинные флюиды поступают из корового магматического очага (возможно из верхней мантии) в осадочный чехол. Здесь они перемещиваются с вадозными водами

и по проницаемым трещинам проникают в различных районах кальдеры на дневную поверхность.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 11-05-00 572.

Список литературы

1. Аверьев В. В., Богоявленская Г. Е., Брайцева О. А. и др. Вулканизм и гидротермы Узон Семячинского геотермального района на Камчатке // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971, С. 207–211.
2. Белоусов В. И., Гриб, Е. Н., Леонов В. Л. Геологические позиции геотермальных систем Долины Гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. 1983. №1. С. 65–80.
3. Бердичевский М. Н., Жданов М. С. Интерпретация аномалий переменного электрического поля Земли. М.: Недра. 1981. 327 с.
4. Брайцева О. А., Богоявленская Г. Е., Эрлих Э. Н. Геологическое строение Узонско-Гейзерной депрессии // Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование, М.: Наука, 1974. С. 10–32.
5. Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.
6. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., Гостоптехиздат, 1962. 364 с.
7. Зубин М. И. Мелекесцев И. В., Таракановский А. А., Эрлих Э. Н. Четвертичные кальдеры Камчатки // Гидротермы, вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 55–65.
8. Карпов Г. А. Современные гидротермы и ртутно-сурмяно-мышьяковое оруденение. М.: Наука. 1988. С. 182.
9. Пилипенко Г. Ф. Гидрогеологическая обстановка кальдеры Узон // Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974 С. 70–83.
10. Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // J. Geophys, 1988. P. 119–127.
11. Swift C. M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Ph. D. Dissertation, MIT, Cambridge. 1967, 248 p.