

УДК 550.8+531.234(571.66)

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В КАЛЬДЕРЕ УЗОН (КАМЧАТКА)

Г.А. Карпов, И.А. Федорченко, Г.П. Яроцкий

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
683006; e-mail: karpovga@kscnet.ru*

Введение

Современные гидротермальные системы в областях активного вулканизма, как правило, локализуются в пределах вулканотектонических грабен-синклиналей (зона Таупо в Новой Зеландии, Паужетка на Камчатке и др.) или в кальдерных вулканотектонических депрессиях (Йелоустон, США; Академия Наук, Узон на Камчатке и др.). Эти структуры обычно выполнены плиоцен-четвертичными вулканогенно-осадочными отложениями [3]. В очагах разгрузок ряда современных гидротермальных систем наблюдаются выходы гидротерм, несущих рудную минерализацию и формирующих зоны сульфидного оруденения и околорудных метасоматитов [1].

С целью исследования геолого-структурных особенностей строения приповерхностного резервуара гидротермальной системы, морфологии зон оруденения и путей миграции гидротерм на Восточном термальном поле кальдеры Узон летом 2008 г. был выполнен комплекс геофизических исследований. В них помимо авторов статьи принимали участие также сотрудница СВ КНИИ ДВО РАН О.П. Лабик и студентка 5 курса Камчатского госуниверситета А.В. Цунаева.

Методика, аппаратура и техника исследований

Комплекс геофизических методов включал электроразведку (электропрофилирование (ЭП) и метод естественного электрического поля ЕП), магниторазведку и термометрию.

Магниторазведка, метод ЕП и термометрия были выполнены в площадном варианте по неупорядоченной сети в одних и тех же пунктах наблюдений (рис. 1). Объёмы измерений для каждого метода составили ~ 300 точек. Привязка пунктов осуществлялась с помощью навигатора GPS (точность не хуже 4 метров).

Работы методом ЕП (SP) выполнялись потенциал-установкой с 4 базовых точек. В качестве измерителя использовался мультиметр M890G, датчиками служили неполяризуемые электроды ВИРГ. Результаты измерений заносились в полевой журнал и таблицу Excel для последующей обработки, которая сводилась к сшивке средних уровней потенциала по всем базам, вычислению приведённого потенциала $U_{sp} = U_n - \sum U_n/n$ и подготовке массивов для геофизических построений в пакете Surfer.

Магнитная съёмка выполнялась в пешеходном варианте. Модуль полного вектора магнитного поля T , нТл измерялся протонным магнитометром ММП-303. Учёт суточных вариаций магнитного поля осуществлялся замыканием ходов на закреплённых точках с частотой не менее 1.5 ч. Результаты фиксировались в журнале наблюдений и в редакторе Excel. Первичная обработка материала сводилась к введению поправок за суточный ход и определению градиента модуля полного вектора $\Delta T = T_n - \sum T_n/n$.

Термометрия была проведена в пунктах измерения естественного поля. Сигнал с термопары регистрировался мультиметром в местах установки неполяризуемых электродов на глубине 0.3 м.

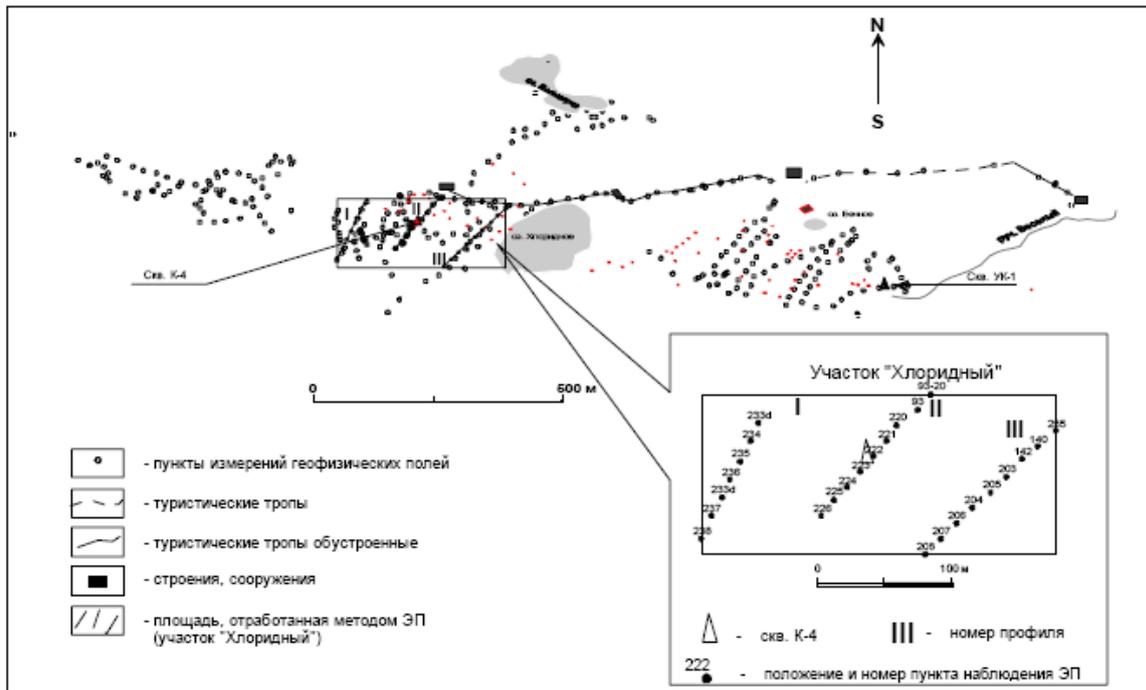


Рис. 1. Схема проведения комплексных геофизических исследований в кальдере Узон.

Электропрофилирование в трёхразном варианте ($AB/2 = 5, 20$ и 50 м) было выполнено симметричной расстановкой Шлюмберже на ограниченных участках по 5-ти субмеридиональным профилям с шагом 20 м и общей протяжённостью ~ 750 м на частотах $f = 1.22, 2.44$ и 4.88 Гц. Работы проводились по стандартной методике с применением комплекта электроразведочной аппаратуры ЭРП-1.

Фактический материал исследований

По результатам измерений потенциальных полей построены карты изолиний естественного потенциала U , мВ (рис. 2а), градиента полного вектора магнитного поля ΔT , нТл (рис. 2б) и температуры $T^{\circ}C$ (рис. 2в). Распределение всех измеренных параметров достаточно хорошо коррелируется: экстремумы естественного потенциала соответствуют экстремумам магнитного и температурного полей. Естественные электрическое, магнитное и температурное поля имеют значения более низкие в восточной части площади (участок оз. Банное). В центральной части второго участка (к западу от оз. Хлоридное) по данным электропрофилирования выявляется протяжённая зона низких сопротивлений (менее $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) субширотного простирания в диапазоне глубин $20\text{-}25$ метров.

Рассмотрим более детально материал по центральному участку «Хлоридный», где ранее было околонушено сульфидное рудопроявление [1]. В ходе обработки первичного материала отрисованы карты площадного распределения кажущегося сопротивления ρ_k , $\text{Ом}\cdot\text{м}$ для частоты $f = 4.88$ Гц и питающих разносов $AB/2 = 5, 20$ и 50 м и вертикальные разрезы ρ_k по профилям I, II, III (рис. 3). По этим же профилям с помощью специализированного программного пакета *iri2win* получены формальные, в силу ограниченного количества питающих разносов AB , оценки удельных параметров в диапазоне глубин $0 - 25$ м. В целом, значения удельных сопротивлений проявленных структур соответствуют значениям ρ_k , а глубины составляют $AB/4$, м.

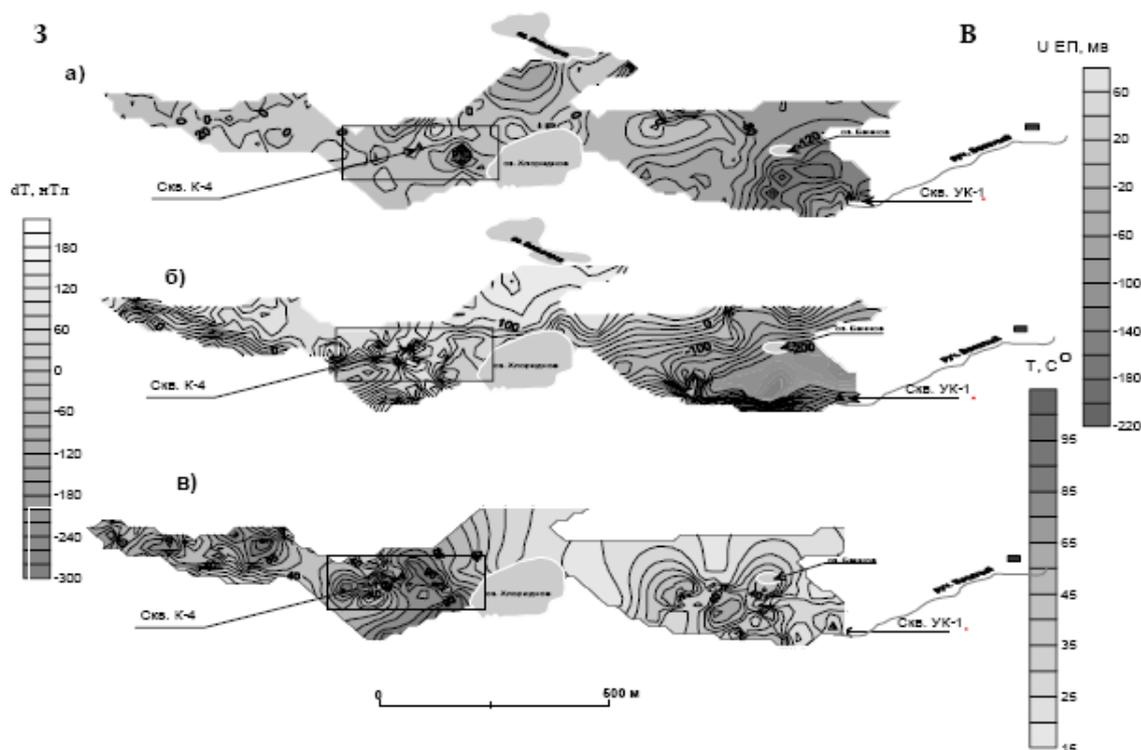


Рис. 2. Карта-схема распределения естественного электрического поля (а), магнитного (б) и температурного полей на Восточном термальном поле.

Геологическая интерпретация геофизических данных

По геолого-геофизическим характеристикам поисковой модели [2, 3, 4] геологический разрез Восточного термального поля кальдеры Узон является полным аналогом разведанных площадей развития гидротермальноизменённых пород [2]. С этих позиций проведена интерпретация полученных геофизических полей. По морфологическим признакам в потенциальных полях вполне отчетливо можно выделить пять участков (рис. 4).

Участок А характеризуется нормальным ЕП с локальными минимумами интенсивностью ± 20 мВ. В магнитном поле он отражён положительным полем магнитной ступени (50-60 нТл/100 м) с локальным максимумом (80-100 нТл). Участок ярко проявлен в температурном поле $T^{\circ}\text{C}$ в виде локальных (80-180 м) изометричных максимумов с $T^{\circ}\text{C}$ 80-85 $^{\circ}\text{C}$. В целом, геологическое строение участка определяется распространением слабоизменённых вулканитов андезитового состава, среди которых по зонам нарушений фиксируются выходы газогидротерм типа точечных проколов. Эта точечность хорошо видна в поле $T^{\circ}\text{C}$ и намечается в поле ЕП локальными изометричными аномалиями.

Участок Б (Хлоридный) характеризуется полем ЕП, созданным группой локальных минимумов изометричной формы интенсивностью $-20 \div -60$ мВ. Намечается некоторая корреляция этих минимумов. В магнитном поле участок характеризуется сложным мозаичным строением из изометричных и эллипсовидных минимумов интенсивностью 40-60 нТл. Они взаимно ортогональны, что является признаком связи с трещиноватостью пород разреза, в т.ч. дорудной. Эта характеристика отражена в поле

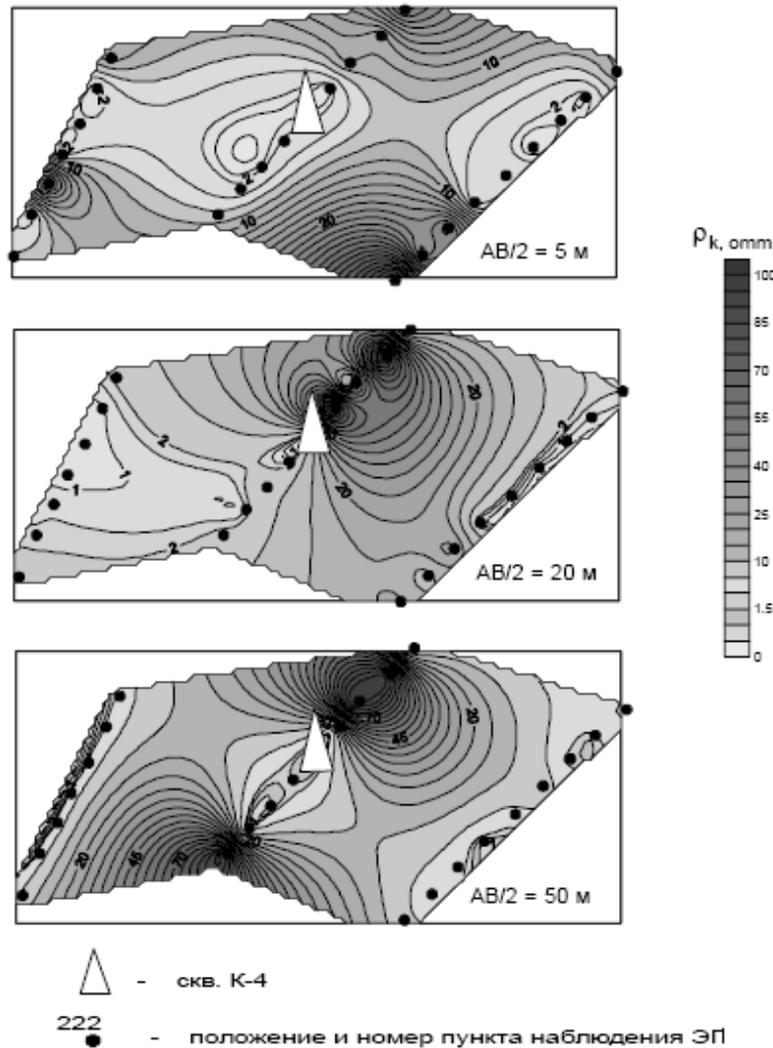


Рис. 3. Карта-схема изолиний кажущегося сопротивления ρ_k для $AB/2 = 5, 20$ и 50 метров в изометрической проекции (участок «Хлоридный»).

T^0C , там выделяется группа максимумов с ориентацией осей на СЗ и СВ и интенсивностью $80-90^0C$. В целом, геофизическая характеристика тремя методами даёт картину блокового строения этого участка. Разрез его характеризуется очень низкими значениями кажущегося сопротивления ρ_k . В пределах собственно термального поля они не превышают $20-30 \text{ Ом*м}$, а в аномальных фрагментах $\rho_k=0.1-1.5 \text{ Ом*м}$. Исключением является высокоомный выступ сложной конфигурации в северо-восточной части профиля II, зафиксированный по пикетам 93-2 – 222 в диапазоне глубин $2 - 25$ м (рис. 5). Здесь сопротивление в максимуме превышает 100 Ом*м . Наибольший интерес представляет протяжённая зона субширотного простирания, ограниченная изолинией 1 Ом*м , выделенная на всех трёх профилях. На профиле I она приближается к дневной поверхности до уровня $1-2$ м (пикеты 236-235-237), на глубине $\sim 10 - 14$ м имеет наибольшую ширину ~ 80 м и в нижней части разреза вырождается, т.е., скорее всего, имеет ограниченную мощность. На втором профиле зона выходит на дневную поверхность между пикетами 222 и 223 (скв. 4), в нижней части разреза не ограничена по глубине и имеет тенденцию к увеличению горизонтальных размеров до ~ 50 м. На профиле III минимальные значения ρ_k проявлены фрагментарно на малых глубинах, что свидетельствует о вырождении её в восточном направлении. Можно расширить пространственные границы выделенной аномалии, скажем, изолинией

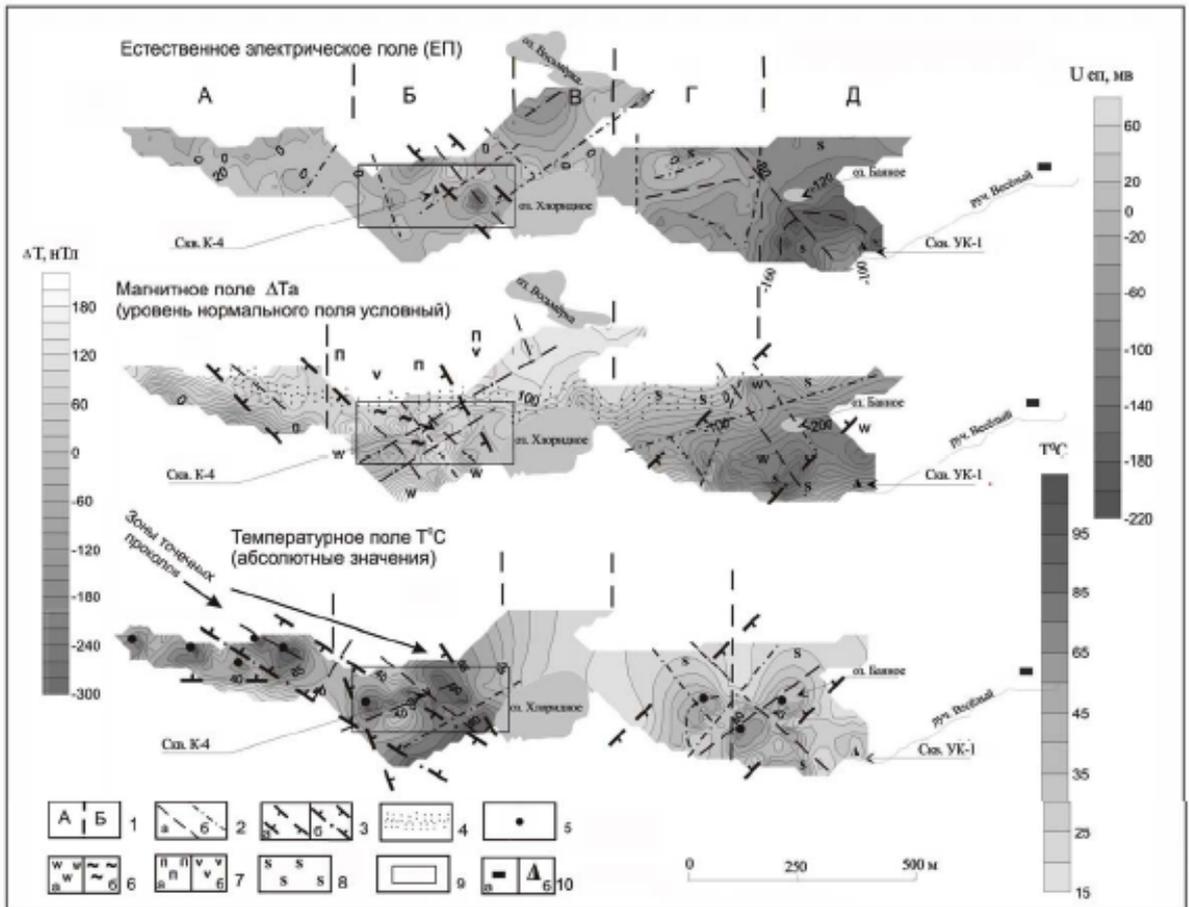


Рис. 4. Районирование и геологическая интерпретация геофизических полей Восточного термального поля кальдеры Узон.

Условные обозначения: 1 – аномальные участки, их границы. Разломные дислокации: 2- геологические нарушения, в т.ч. осевые линии аномалий: а – уверенные, б – предполагаемые; 3 – разломные зоны, в т.ч. зоны локализации температурных проколов: а – уверенные, б – предполагаемые; 4 – тектоническая граница гидротермально изменённых пород – северная граница Восточного термального поля, предполагаемая; 5 – температурные аномалии поля T^0C – газогидротермальные проколы. Гидротермально изменённые породы: 6 – существенно кварцевые центральные фации: опалиты (а), краевые глинистые фации (б); 7 – пропилитизированные вулканиты (а), неизменённые туфы и лавы (б). 8 – участки детальных работ методом электропрофилеирования; 9 – постройки (а), скважины (б).

$\rho_k = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, однако внутри зоны контрасты по сопротивлениям весьма значительны и достигают 1-1.5 порядков. Вероятнее всего этот эффект обусловлен присутствием рудной компоненты различной концентрации, в то время как обрамляющие геоэлектрические структуры отображают степень обводнённости вмещающей среды, ионной активности и температуры растворов.

Участок В является переходным. Часть его площади занимает озеро Хлоридное с почти безаномальными физическими полями на обрамлении. Лишь в поле ЕП выделены единичные некоррелируемые аномалии. Безаномальность полей ΔT и T^0C может быть связана с отсутствием точек наблюдений (рис. 1) и формальной интерполяции значений программой при построении поля изолиний.

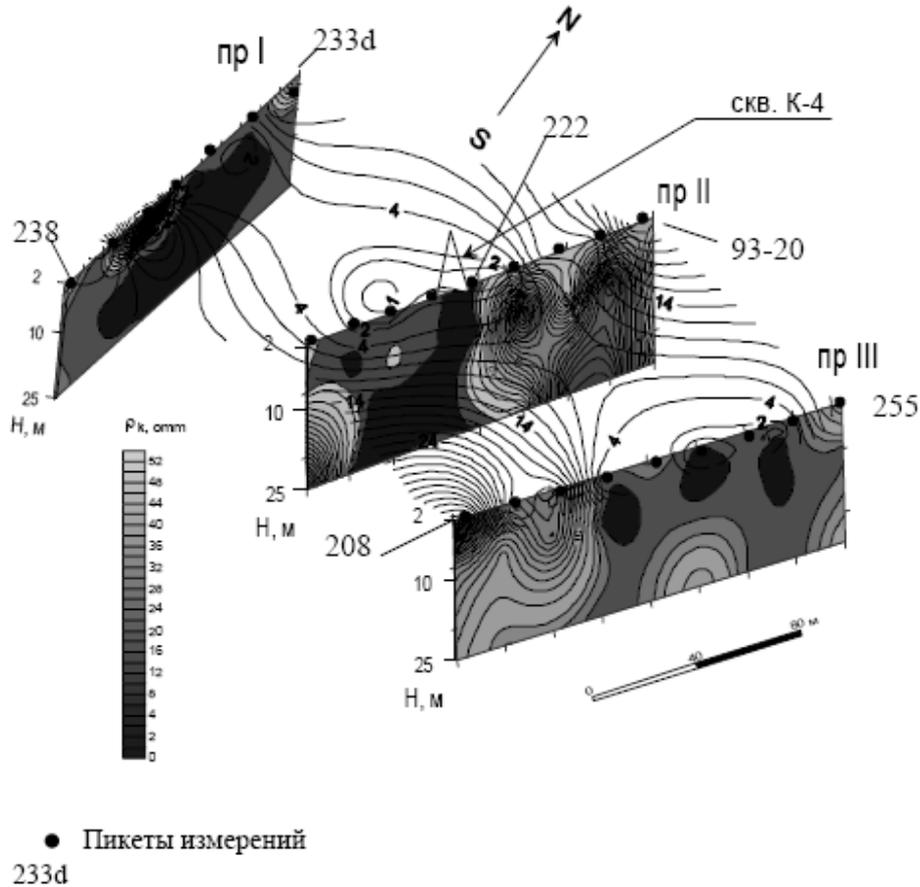


Рис. 5. Распределение кажущегося сопротивления в пространстве (участок «Хлоридный»). В изолиниях без заполнения представлена карта ρ_k ($AB/2$) для разносов 5 м.

Участок Г в поле ЕП характерен очень крупной СВ эллипсовидной аномалией интенсивностью до -80 мв с падением потенциала от периферии к центру. Прямоугольная форма говорит о блоке пород, в котором к центру аномалии процессы окисления затухают. В магнитном поле ей целиком отвечает аналогичный блок зоны линейного градиента поля (100 нТл/ 120 м). Блок отражён и в поле T^0C минимумом изометричной формы с некоторым прослеживанием к СЗ, чего не видно на полях ЕП и ΔT .

Участок Д в потенциальных геофизических полях проявляется наиболее сложным образом. В поле ЕП он выражен сектором четверти круга с центром на крайнем ЮВ и размером по диаметру около 250 м. Интенсивность $-100 \div -200$ мв позволяет предполагать существование мощных окислительно-восстановительных потенциалов зоны окисления. Возможно, что этот сектор отражает некую структуру центрального типа, в центре которой процессы наиболее сильные, нежели по окружности, т.е. связаны с менее изменёнными породами. В поле ΔT минимуму ЕП отвечает подобный минимум интенсивностью $-200 \div -240$ нТл. С магнитным минимумом хорошо коррелируется поле T^0C интенсивностью $40-65^0C$. Совпадают общие контуры и локальная аномалия в центральной части, ось которой ориентирована на СВ. По совокупности признаков всех трёх полей геологический разрез участка Д представляется в виде блока северо-восточного простирания шириной 250 м и длиной 350 м. Здесь вероятна максимальная мощность изменённых пород с поднятым локальным блоком внутри, что обусловило снижение потенциала ЕП в центральной части. В поднятой части на её северном борту фиксируются температурные

максимумы, отражающие линейную зону нарушения внутри массива изменённых пород.

Вся площадь термального поля во всех трёх геофизических полях характеризуется обилием локальных нарушений, разломов. Они проводятся по линиям градиентов полей, центрам многочисленных локальных аномалий и их осям. Наиболее ярко выражены зоны разлома на участках А и Б в поле T^0C в виде локальных проколов. Нарушения, выделенные по ЕП, отражают границы блоков либо локальные процессы в зонах разломов. Линии градиентов поля ΔT показывают геологические нарушения в т.ч. между неизменёнными и слабо изменёнными вулканитами и вторичными кварцитами. Разломные зоны разделяют всю изученную площадь на участки с разнотипными полями блоковой морфологии. Простирающиеся разломные дислокации подавляюще СЗ и СВ, менее очевидны другие направления. Именно СВ и СЗ дислокациями создана блоковая структура термального поля, включая его самый мощный разрез на востоке площади.

Намечена разломная зона, отделяющая Восточное термальное поле от площади оз. Восьмёрки, однако для её обоснования не хватает наблюдений на севере.

На основе интерпретации данных по распределению кажущегося сопротивления в пространстве на участке «Хлоридный» (где, как указывалось выше, проявляется зона сульфидного оруденения и на поверхность выходят наиболее высокотемпературные растворы) мы построили, в первом приближении, объёмную модель рудного тела. Если исходить из того, что минимумы сопротивления характеризуют зоны повышенной минерализации, то на рис. 5 видно, что скв. К-4 прошла практически по центру зоны оруденения. Локализация зоны оруденения, по-видимому, определяется повышенной проницаемостью пород и конфигурацией порово-трещинного коллектора гидротерм.

Основные выводы

1. Площадное распределение всех измеренных параметров хорошо коррелируется: экстремумы естественного потенциала соответствуют экстремумам магнитного и температурного полей.

2. Естественное электрическое, магнитное и температурное поля имеют значения более низкие в восточной части площади (участок оз. Банное).

3. В центральной части площади (к западу от оз. Хлоридное) по данным электропрофилирования выявляется протяжённая зона низких сопротивлений (менее $1 \text{ ом} \cdot \text{м}$) субширотного простираения в диапазоне глубин 20-25 м.

4. Разломная тектоника фиксирует границы гидротермальноизменённых пород и линии локально прогретых (точечных) «проколов» на всей площади. На западе термального поля - это точечные выходы терм ($65 - 90^0C$), в восточной части - это осевые нарушения в толще прогретого массива изменённых пород. Массив отчётливо выражен минимумами U и ΔT . Намечена широкая зона, на западном окончании которой известно нефтепроявление. Зона низких сопротивлений на участке «Хлоридный», вероятно, отображает конфигурацию рудного тела.

Заключение

Согласно имеющимся и полученным новым системным данным, геолого-геофизическая модель Восточного термального поля кальдеры Узон представляется в виде формирующегося массива гидротермальноизменённых пород с локальными зонами оруденения.

Гидротермальноизменённые породы широко распространены на площадях развития миоценовых, плиоцен-четвертичных и современных вулканитов. Они сформировались в процессе газогидротермального привноса-выноса с изменением вещественного состава исходных вулканогенных пород. В них остаётся кремниевый скелет, выносятся железо, кальций, алюминий, магний, возникают фации вторичных

минералов. Массивы гидротермальноизменённых пород характеризуются зональностью, созданной рудоносными растворами, циркулирующими по подводным каналам (разломам, зонам дробления). Каналы выполнены монокварцитами в древних месторождениях и опалитами, а по периферии развиваются фации низкотемпературных метасоматитов – аргиллиты, пропилиты. В процессе привноса образуются диамагнетики и диэлектрики (кварц, сера, алунит, серицит, др.) с сульфидами железа (мельниковит, марказит, пирит), меди (диагениит, халькозин, ковеллин). В изменённых породах, выведенных на поверхность, формируется зона окисления с образованием природного электролита – источника окислительно-восстановительных электрических потенциалов естественного электрического поля, интенсивность которого и позволяет выявлять особенности разрезов. На исследованном Восточном термальном поле кальдеры Узон массив аргиллизированных пород хорошо проявлен на поверхности в северном и восточном обрамлении поля. Здесь гидротермы поступают к поверхности по зонам трещиноватости, о чём свидетельствуют точечные проколы, широкое развитие грязевых котлов и грязевых вулканчиков. Представляется, что скрытая часть формирующегося массива располагается к юго-востоку от термального поля, и лишена температурных проявлений вследствие перекрытия глинистыми фациями, на которых, по-видимому, и образовались торфяные болота у подножья экстрезии г. Белой. Об этом свидетельствует разрез скважины УК-1. Судя по градиенту магнитного поля, подошва комплекса пород центральных фаций залегает на глубинах около 350 м.

Список литературы

1. *Карпов Г.А.* Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковистое оруденение. М. : «Наука». 183 с.
2. *Яроцкий Г.П.* Применение магнитометрии при изучении вторичных кварцитов Камчатки. Сб. Молодые гидротермально изменённые породы и минералы Камчатки и Курильских островов. М. ; «Наука». 1969. С. 174-182.
3. *Яроцкий Г.П.* Геолого-геофизические закономерности размещения вулканических серных месторождений Тихоокеанского рудного пояса (Корякия, Камчатка, Курилы, Япония). П-Камчатский. : Изд-во КамГУ, 2006. 138 с.
4. *Яроцкий Г.П.* Физические свойства вулкаников и изменённых пород Северо-Камчатского сероносного района //Геология и геофизика. 1970. № 3. С. 74-80.
5. *Hedtuquist J., Heully R.M.* Hydrothermal eruption in the geothermal system. New Zealand, their origin associated breccias and relation to precious metal mineralization //Econ. Geol. 1985. V. 80. P. 1640-1668.

RESULTS OF INTEGRATED GEOPHYSICAL STUDIES OF UZON CALDERA, KAMCHATKA

G.A. Karpov, I.A. Fedorchenko, G.P. Yarotsky

The Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: karpovga@kscnet.ru

The paper provides the results of magnetic, geoelectric and heat flow measurements conducted in the eastern thermal field at Uzon caldera. We obtained the first approximation of the geological and geophysical model showing the near-surface zone of the currently forming massive of altered rocks with evidence of mineralization.