

УДК 551.21/23, 550.837

Т.А. КОТЕНКО, Г.Л. ПАНИН, Е.В. БАЛКОВ, Д.И. ФАДЕЕВ

## Применение малоуглубинной электроразведки для изучения гидротермальных объектов вулкана Эбеко (остров Парамушир)

*Приводятся данные о применении электротомографии на постоянном токе для изучения фумарольных полей влк. Эбеко (о-в Парамушир, Курилы). Ставилась задача поиска малоуглубинных гидротермальных резервуаров и определения их мощности и конфигурации. Буферные свойства данных объектов рассматриваются как одна из основных причин дифференциации составов газов разных термальных полей при едином источнике глубинного флюида. Получены карты структуры подповерхностного пространства до глубины 20–40 м, картированы малоуглубинные высокоминерализованные гидротермальные объекты.*

*Ключевые слова: электроразведка, томография, высокоминерализованный резервуар, вулкан, фумарольные газы.*

**The application of shallow electrical tomography to the study of hydrothermal objects of the Ebeko Volcano (Paramushir Island, Kurils).** T.A. KOTENKO (Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky), G.L. PANIN, E.V. BALKOV, D.I. FADEEV (Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk).

*In this paper we present the data of the direct-current electrical resistivity tomography (ERT) using to study volcanic fumarole fields Ebeko (Paramushir Island of Kurils). The aim was to find shallow hydrothermal reservoirs and determine their dimensions and configuration. Buffer properties of these objects are regarded as one of the main reasons for the differentiation of gas compositions of different thermal fields with a single source of deep fluid. We obtained the 2D maps of the subsurface area up to a depth 20–40 m. We found shallow depth hydrothermal objects with highly mineralization.*

*Key words: ERT, tomography, hydrothermal reservoir, volcano, fumarole gases.*

### Введение

Объект исследований – активный влк. Эбеко (о-в Парамушир, Курильские острова), сложный вулкан типа Сомма–Везувий высотой 1156 м. Породы, слагающие постройку, – андезибазальты и андезиты. Три соприкасающихся кратера диаметром 250–320 м и глубинами 70–100 м вытянуты в субмеридиональном направлении. На дне северного и южного кратеров, а также на внешних склонах кратеров наблюдается активная фумарольная и гидротермальная деятельность. Исследования проводились в 2011–2014 гг. на трех фумарольных полях вулкана: Июльском, Юго-Восточном и в Южном кратере (рис. 1). Фумарольные поля расположены на близких гипсометрических высотах, но во вмещающих структурах разной геометрии. Поле Южного кратера находится в чаше кратера,

---

\*КОТЕНКО Татьяна Анатольевна – научный сотрудник (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский), ПАНИН Григорий Леонидович – кандидат технических наук, научный сотрудник, БАЛКОВ Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФАДЕЕВ Денис Игоревич – младший научный сотрудник (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск). \*E-mail: sias2011@rambler.ru

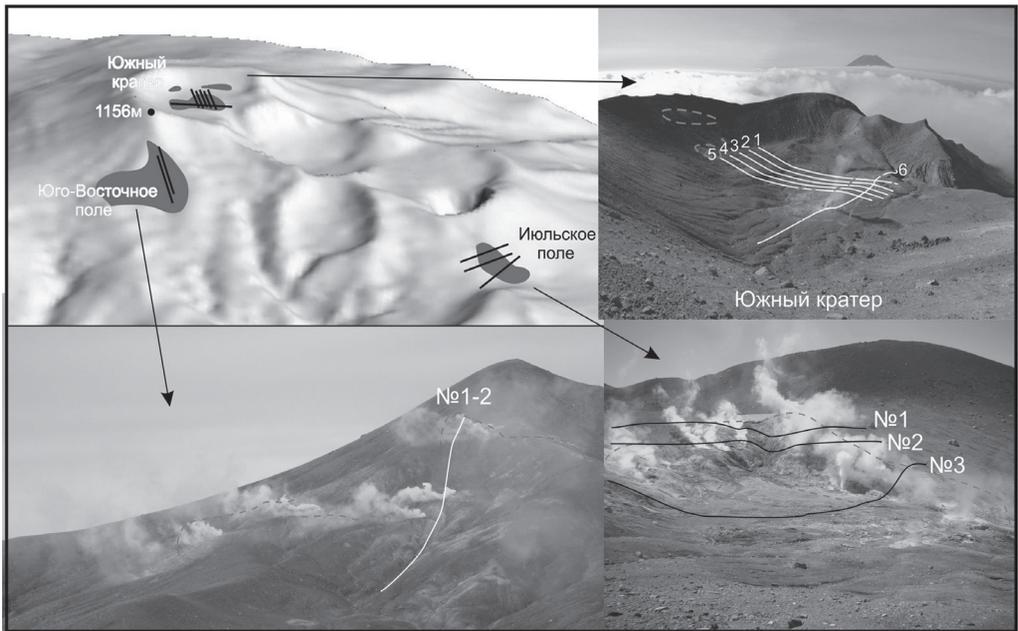


Рис. 1. Схема района работ на влк. Эбеко. Пунктиром обозначены границы термальных полей, линиями – профили электротомографии, цифрами – их номера

северная часть которого срезана и имеет поверхностный сток в Средний кратер. Юго-Восточное поле расположено на склоне крутизной до  $33^\circ$ . Июльское поле состоит из двух участков: верхняя часть при крутизне до  $30^\circ$  разрезана руслом ручья глубиной до 10 м, нижняя часть – пологая.

Выбранные объекты характеризуются различным химическим составом фумарольных газов при едином источнике флюида. А так как одной из причин дифференциации состава газов могут быть буферные свойства малоглубинных гидротермальных резервуаров, то была поставлена задача поиска данных объектов и определения их геометрических параметров.

### Метод исследований

В качестве инструмента для решения поставленной задачи была выбрана методика электротомографии [1, 2]. Основным отличием электротомографии от классических вертикальных электрических зондирований является использование многоэлектродных электроразведочных кос и полная автоматизация измерений. Высокая производительность полевых измерений во многом определяет возможность применения этого метода в сложных полевых условиях. В работе задействован комплекс многоэлектродной электроразведки на постоянном токе «Скала-48», который разработан в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН совместно с ООО «КБ Электрометрии» [2]. В аппаратном комплексе «Скала-48» базовыми установками являются: дипольная, Веннера, Шлюмберже, а также двух- и трехэлектродные. Для решения поставленной задачи применили установку Шлюмберже: она обладает одинаковой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам, являясь компромиссом между установками Веннера и дипольной, глубиной на 10 % большей, чем у установки Веннера, и средним горизонтальным покрытием [1]. Были использованы два электроразведочных кабеля с общим количеством электродов, равным 48. Был выбран максимальный шаг между электродами, равный 5 м, для достижения наибольшей

глубины зондирования (до 43 м) при максимальном разnose установки 235 м. Для количественной интерпретации данных метода сопротивлений использовались пакеты программ Res2Dinv от Geotomo Software [2].

Данный метод электроразведки основан на определении удельного электрического сопротивления (УЭС)  $\rho$ . Кажущееся сопротивление является сложной функцией параметров геологического разреза. Как известно [4], по электрическому сопротивлению все горные породы и руды делятся на породы-проводники I рода с высокой электронной проводимостью за счет электропроводящих минералов и породы-проводники II рода с ионной проводимостью, в которых порообразующие минералы являются изоляторами, а ток проводится ионами заполняющего поры флюида. Проводниками II рода с известными диапазонами УЭС являются все породы: магматические (350–10 000 Ом·м); метаморфические (103–107); скальные, осадочные (10–105); песчано-обломочные (10–104), глинистые (1–100 Ом·м) [4, 5]. УЭС образцов гидротермально-измененных пород, встречающихся на выбранных объектах, входят в диапазон 15,7–148,41 Ом·м. Большие интервалы изменения УЭС горных пород обусловлены широким спектром факторов. Однако решение поставленной задачи, а именно идентификация высоко минерализованных подземных вод во вмещающих породах, несмотря на значительный разброс параметров среды, возможно благодаря предельно низким УЭС (0,1–4,0 Ом·м) гидротермального флюида. Методика дистанционного зондирования гидротермальных объектов впервые была опробована и отработана на термальных котлах Донного поля влк. Мутновский [3].

## Результаты и обсуждение

На **Июльском фумарольном поле** было отработано три профиля (рис. 1). Распределение УЭС по результатам инверсии электротомографии представлено на разрезе на рис. 2. Величины УЭС меняются от 0,1 до > 10 000 Ом·м. Наибольший диапазон УЭС получен для разреза № 2, наименьший – для разреза № 3.

Разрез № 1. Самые высокие значения УЭС 1100–9800 Ом·м зафиксированы на нескольких малых участках от поверхности до глубины 2–3 м. Нижнюю часть разреза составляют величины УЭС 140–700 Ом·м. Для центральной и верхней части разреза наблюдаются УЭС менее 120 Ом·м, вмещающие в себя линейно расположенные низкоомные структуры с УЭС 0,1–4 Ом·м. Один из объектов с малым сопротивлением крупнее других, имеет размер около 20·30 м на глубине 10–30 м. Он чуть смещен к западу от осевой линии профиля.

Разрез № 2 смещен от разреза № 1 вниз по склону на 20 м. Участки с высоким УЭС – от 1100 до 7500 Ом·м – это крупная область в нижней части разреза на глубинах больше 10 м, а также небольшие объекты вблизи поверхности и на глубине около 10 м. Так же, как и на разрезе № 1, для центральной и верхней части разреза наблюдаются УЭС менее 120 Ом·м, заполненные разобщенными линейно расположенными низкоомными фрагментами. Наблюдается объект, идентичный объекту на профиле № 1, более крупного размера, чем остальные (около 10 х 30 м), на глубине 15–25 м. Он также смещен к западу от осевой линии профиля.

Разрез № 3. Здесь только один небольшой участок с относительно высоким для данного разреза УЭС – 140–750 Ом·м. Он находится в верхней части разреза и простирается по глубине не более чем на 4–5 м, длина около 50 м. На всей остальной части пространства УЭС менее 130 Ом·м. Малым УЭС (0,1–4 Ом·м) отличаются небольшие разобщенные линзы и два крупных объекта. Первый объект идентичен выявленному на предыдущих разрезах, размером около 20 х 30 м на глубине 10–30 м. Второй начинается в центральной части на глубине 2–3 м и уходит вертикально вниз. Его корневая часть находится за пределами разреза.

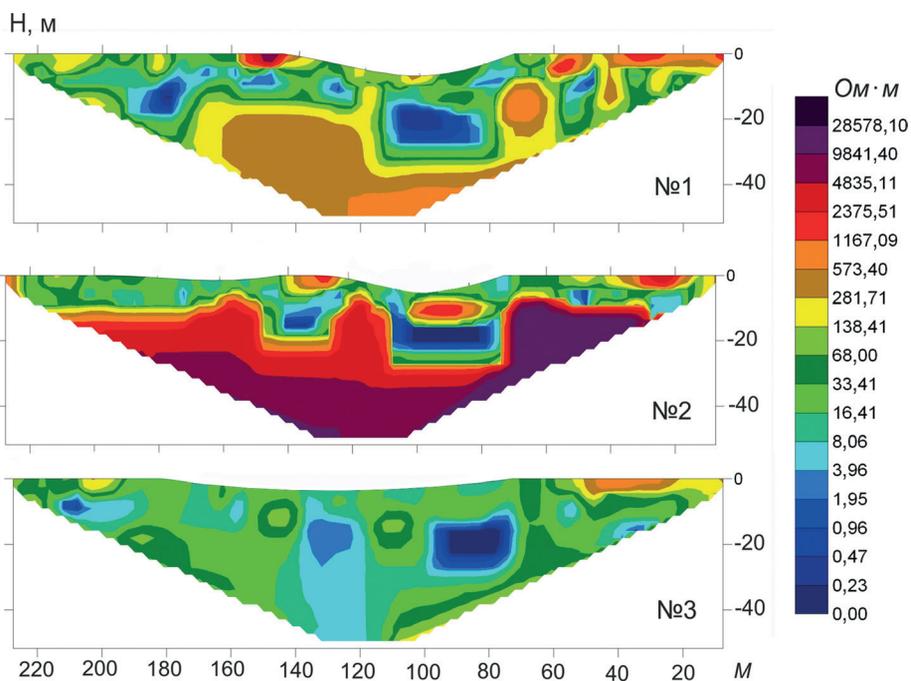


Рис. 2. Распределение УЭС по результатам инверсии электротомографии для Июльского поля

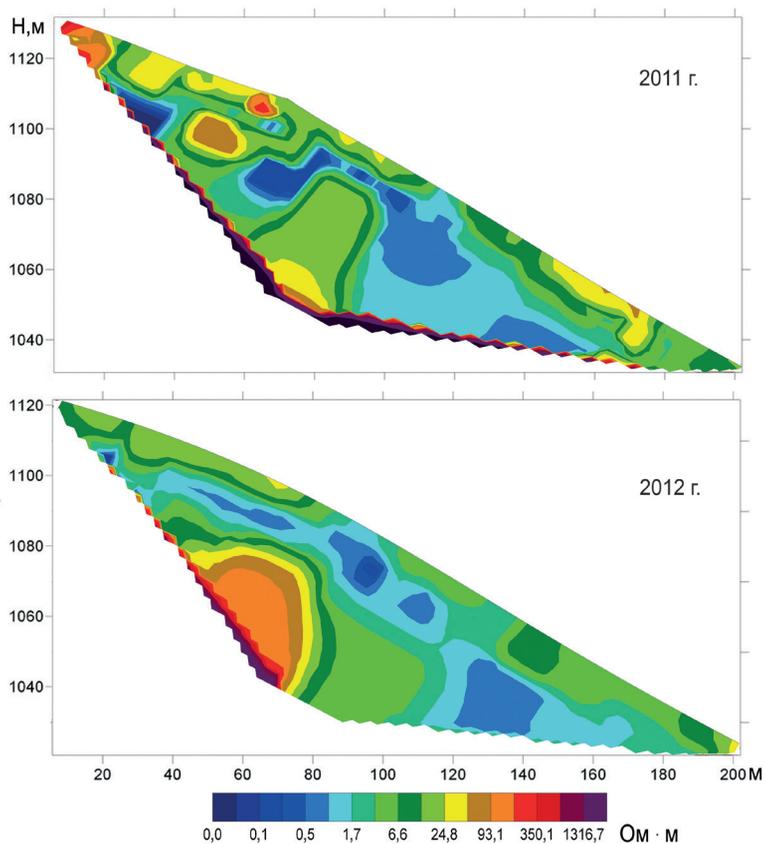


Рис. 3. Распределение УЭС по результатам инверсии электротомографии для Юго-Восточного поля

Исходя из характерных для пород вулкана значений УЭС внутреннее строение термального поля представляется следующим образом: на первых двух профилях верхней части термального поля нижняя часть разрезов сложена магматическими породами с высокими УЭС – андезибазальтами. В области разреза № 2 наблюдается наибольшая массивность пород. Кровля данных пород служит водоупором, выше которого в песчано-обломочном с глинистым заполнителем пирокластическом чехле сформировались близповерхностные разрозненные флюидонасыщенные участки с вертикальной протяженностью от 2–3 до 20 м. Наибольший интерес представляет трубообразная питающая зона, протянувшаяся через все термальное поле и, возможно, связанная с гидротермальным объектом, расположенным в подповерхностном пространстве нижней выположенной части поля и имеющим максимальную вертикальную протяженность. Данный объект представляется нам верхушкой более глубокого гидротермального резервуара. УЭС для этой флюидонасыщенной зоны имеют меньшие величины (2–8 Ом · м), чем для субгоризонтального «канала» (0,1–2 Ом · м). То есть, вероятнее всего, данный участок заполнен раствором меньшей минерализации. Возможно, это объясняется значительным проникновением в эту область пресных поверхностных вод благодаря чашеобразной форме участка (фильтрационная ловушка).

На **Юго-Восточном фумарольном поле** отработаны два почти идентичных профиля в 2011 и 2012 гг. Профиль 2012 г. смещен вниз по склону относительно профиля 2011 г. на 35 м. Профили проходили по левому борту русла сухого ручья сверху вниз по склону, перепад высот составил 100 м, длина разрезов 235 м. УЭС на рабочем участке Юго-Восточного поля (рис. 3) колеблется в пределах 0,1–830 Ом · м. Максимальные величины УЭС 180–830 Ом · м очерчивают локальные участки в верхней части разреза 2011 г. (профиль 1) и на глубине 1080–1040 м в центральной части обоих разрезов. Выделяются два низкоомных участка с УЭС 0,1–4 Ом · м. Верхний объект с малым сопротивлением располагается на высоте 1100–1085 м, второй низкоомный объект в верхней части представляет собой линзу толщиной 5–10 м, которая в нижней части разреза увеличивает свою мощность до ~ 30 м. Кроме того, прослеживаются низкоомные «каналы», выходящие на дневную поверхность. Один на разрезе 2011 г. и два – на разрезе 2012 г. Остальное пространство разрезов заполнено породами, удельное сопротивление которых не превышает 50 Ом · м.

Опираясь на известные диапазоны УЭС для встречающихся на рабочем участке пород, получили следующую геологическую интерпретацию разрезов: высокие значения УЭС, равные 180–830 Ом · м, характеризуют малоизмененные андезибазальты, слагающие постройку конуса и крупные блоки обломочного материала. УЭС с промежуточными значениями 20–130 Ом · м соответствуют в разной степени гидротермально измененной (вплоть до глин) пирокластике, покрывающей вулканический конус. Низкоомные участки идентифицируются как насыщенные рассолом трещиноватые зоны – близповерхностные гидротермальные резервуары. Кроме того, четко прослеживается расположение подводящих каналов кипящих котлов: один на разрезе 2011 г. и два – на разрезе 2012 г. Гидротермальные резервуары существуют несмотря на значительную крутизну склона. Максимальные расчетные значения минерализации рассола могут достигать в пределах разреза 84 г/л ( $\rho = 0,1$  Ом · м), так как данные участки можно считать практически открытыми трещинными зонами транспорта. Величина УЭС по формуле расчета данного параметра для свободных подземных вод по [4]:

$$\rho = 8,4/M,$$

где  $\rho$  – УЭС, Ом · м;  $M$  – общая минерализация, г/л, определяется только ионной проводимостью циркулирующего раствора.

Увеличение мощности флюидонасыщенной зоны с понижением высоты может свидетельствовать в пользу того, что она является вершиной корневой гидротермальной питающей структуры. Нижняя граница флюидонасыщенной зоны фиксирует водоупорный

слой на глубине около 20 м под поверхностью. Данный слой может представлять собой монолитные магматические породы, частично выявленные на разрезах как объекты с высоким УЭС.

В Южном кратере (рис. 1) отработаны шесть профилей: № 6 длиной 167 м и № 1–5 по 120 м, что позволило получить данные распределения УЭС до глубины 20 м. На разрезе № 6 (рис. 4) диапазон полученных значений сопротивлений составляет 0,23–1167 Ом · м. Область максимальных значений (800 Ом · м и более) находится в северо-западной части профиля. Области с промежуточными значениями обрамляют низкоомную центральную часть. Данная часть разреза и представляет наибольший интерес: это удлиненная зона на глубине 2–12 м, ориентированная с ЮЮВ на ССЗ, ограниченная изолинией 4 Ом · м и имеющая форму лакколита. Имея ограниченную мощность, только в центральной части разреза область низких УЭС уходит вертикально вниз, расширяясь от 10 до 20 м. Еще один низкоомный фрагмент проявлен на глубинах 3–10 м в юго-восточной оконечности разреза.

Разрезы № 1–5 (рис. 5) характеризуются значениями кажущегося сопротивления  $\rho$  в широком диапазоне: от 1170 до 0,4 Ом · м. Максимальные значения встречены линейно в приповерхностном слое в юго-западной части кратера. Они также формируют область от поверхности до максимальной глубины 15 м, относящуюся к участку кратерной стенки и перегиба. Кроме того, максимальные величины УЭС оконтуривают на разрезах 1 и 2 крупную зону на глубине 5–20 м.

В пределах термальных выходов УЭС не превышает 20 Ом · м, вблизи дневной поверхности на разрезах 3 и 4 проявлены два аномальных участка с  $\rho = 3,6\text{--}4$  Ом · м. Области минимальных значений УЭС (0,4–4 Ом · м) сосредоточены в северо-восточной части участка. На разрезах 4 и 5 малые значения  $\rho$  формируют единую область, представляющую собой часть общей аномалии, выраженной на разрезе 6.

С учетом имеющихся геологических данных геолого-геофизическая модель дна Южного кратера представляется в виде трубки взрыва, жерловая часть которой, заполненная брекчированным материалом, является флюидопроводящей сильнотрещиноватой зоной. Трубка имеет наклон на северо-восток. Окружающее пространство вблизи трубки заполнено деформированными кратерно-озерными отложениями, наблюдается субвертикальная зональность электрического сопротивления.

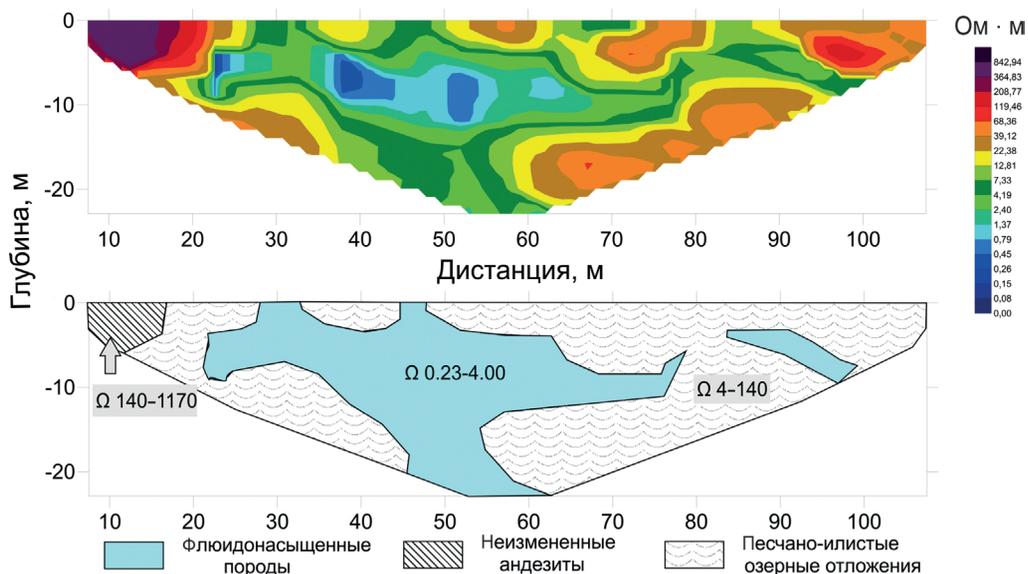


Рис. 4. Распределение УЭС по результатам инверсии электротомографии для Южного кратера и геологическая модель (профиль № 6)

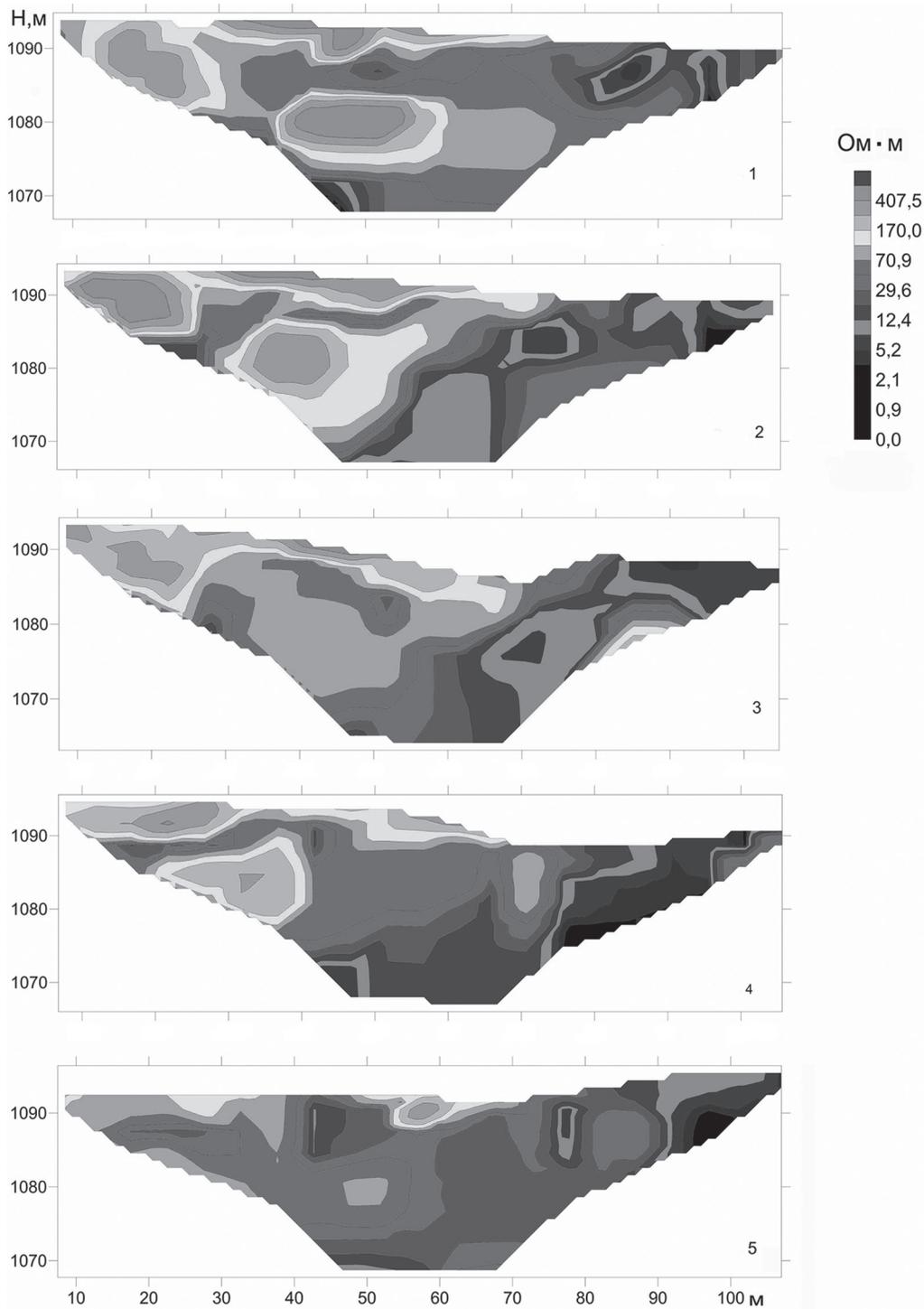


Рис. 5. Распределение УЭС по результатам инверсии электротомографии для Южного кратера. Профили № 1–5

Значения УЭС, равные 140–800 Ом · м, характеризуют несортированный обломочный материал осыпей кратерных стенок как на поверхности, так и на глубине (захороненная осыпь). УЭС со значениями 20–130 Ом · м соответствуют стратифицированным озерным осадкам и серным илам. Установлено наличие гидротермального резервуара мощностью не более 10 м и горизонтальными размерами предположительно не более 80 x 40 м. Жерло и гидротермальный резервуар представляют собой телескопическую пару. Оба объекта смещены от центра кратера к северо-востоку. Граница гидротермального резервуара околнута изолинией 4 Ом · м. Максимальные расчетные значения минерализации раствора могут достигать в центральной части резервуара 36,5 г/л ( $\rho = 0,23$  Ом · м). Корневая часть гидротермального резервуара имеет коническую структуру, находится под его центральной частью и приурочена к жерлу кратера.

## Выводы

Для исследования внутренней структуры различных термальных полей активного влк. Эбеко был применен метод томографии на постоянном токе. Для всех полей подтверждено наличие малоглубинных высокоминерализованных гидротермальных резервуаров.

Для Июльского фумарольного поля установлены три группы объектов с аномальным УЭС. Самый крупный объект представляет собой трубообразную питающую зону на глубине 10–30 м, длина которой в пределах разрезов составляет 70 м. Прослеживается связь данного «канала» со вторым гидротермальным объектом в подповерхностном пространстве нижней относительно ровной части поля (разрез № 3 на рис. 2). Данный объект имеет вертикальную структуру и представляется нам верхней частью более глубокого гидротермального резервуара. Кроме того, в верхней части поля на массивном основании (глубины 5–10 м) в пирокластическом чехле наблюдаются близповерхностные разрозненные флюидонасыщенные участки с вертикальной протяженностью от 2–3 до 10 м.

Под Юго-Восточным фумарольным полем установлены следующие гидротермальные объекты: маломощный высокоминерализованный горизонт в верхней части поля и более мощный флюидонасыщенный объект под группой крупных фумарол и котлов. Гидротермальные резервуары существуют несмотря на значительную крутизну склона. Увеличение мощности флюидонасыщенной зоны с понижением высоты может свидетельствовать в пользу того, что она является вершиной корневой гидротермальной питающей структуры. Нижняя граница флюидонасыщенной зоны фиксирует водоупорный слой на глубине около 20 м под поверхностью.

Для Южного кратера установлено наличие малоглубинного гидротермального резервуара мощностью не более 10 м и горизонтальными размерами предположительно не более 80 x 40 м. Определен путь поступления минерализованного флюида через сильноотрециноватую жерловую часть кратера, заполненную брекчией. Несмотря на благоприятную вмещающую структуру – чаша кратера, формирования значительного гидротермального резервуара не происходит. На основной части кратера наблюдается интенсивный водообмен, она активно дренируется поверхностными водотоками и грунтовым стоком. Характер нарушения линейной стратификации озерных осадков, отсутствие над донными озерными отложениями пирокластического материала последующих извержений позволяют отнести последнее извержение в Южном кратере к событиям фреатической природы с преимущественно газовой составляющей в продуктах извержения.

Авторы выражают благодарность за всестороннюю помощь в проведении полевых работ Л.В. Котенко и Е.Г. Калачевой (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН), а также Т.И. Ельцову и С.П. Бортниковой (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Опыт применения томографии в геофизике // Геофизика. 2012. № 6. С. 54–63.
2. Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 52–54.
3. Манштейн Ю.А., Бортникова С.Б., Манштейн А.К. и др. Особенности строения проводящих каналов термальных источников вулкана Мутновский (Южная Камчатка) // Докл. АН. 2008. Т. 423, № 3. С. 383–388.
4. Хмелевской В.К. Электроразведка. М.: Изд-во МГУ, 1984. 422 с.
5. Bernstone C., Dahlin T., Ohlsson T., Hogland H. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys // Environ. Geol. 2000. Vol. 39, iss. 3/4. P. 360–371.