

УДК 550.837.6 (571.66), 551.21

ГЕОФИЗИКО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ВУЛКАНА ЭБЕКО

Котенко Т.А.¹, Панин Г.Л.², Котенко Л.В.¹, Карин Ю.Г.²

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: kotenko@sakhalin.ru*

² *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, 630090.*

Аннотация

Приводятся результаты геофизических и геохимических работ, проведенных на fumarольных полях вулкана Эбеко. Целью работы было выявление подводящей структуры каналов кипящих котлов и fumarол для уточнения характера транспорта вещества в приповерхностных условиях, его влияния на химический состав вод и fumarольных газов и их изменение при подготовке к фреатическим извержениям.

Введение

Многолетний геохимический мониторинг состояния действующего вулкана Эбеко показывает, что изменение химизма вод и парогазовых струй при подготовке фреатических извержений проходит по-разному на разных термальных полях: от абсолютной нейтральности к процессу до значительных колебаний химического состава и температурного режима. Эти отличия связывают как с обводненностью постройки, которая обусловлена геометрией вмещающего участка и близостью горизонта грунтовых вод, так и с близостью к центру извержения [6]. Для верной оценки геохимических предвестников извержений немаловажно знать структурные особенности транспорта флюида в приповерхностных условиях. В 2005 г. на склоне вулкана Эбеко возникло новое высокотемпературное fumarольное поле. Химический состав его гидротерм значительно отличался от гидротерм Северо-Восточного поля (традиционная площадка мониторинга), особенно велико было относительное содержание в составе fumarольных газов кислых компонентов (SO₂, H₂S, HCl). Данные гидротермы относятся к выходам подземных вод, локализованных в тектонических нарушениях, и связаны с зонами гидротермально измененных пород [1]. В 2005–2009 гг. проводились сравнительные геохимические исследования на этих объектах, в 2009 г. – геофизическое зондирование с целью выявления структуры подводящих каналов термальных котлов и fumarол. Особый интерес к этим объектам был вызван подготовкой и реализацией в 2009 г. фреатического извержения в Эбеко.

Методы исследования

В 2005–2009 гг. были проведены геохимические исследования на выбранных объектах (рис. 1). Отбирались пробы растворов из кипящих котлов и ручьев и пробы fumarольных газов. Для водных проб в месте отбора с помощью портативного мультипараметрового анализатора Combo определялись pH, Eh, температура растворов. Общий химический анализ выполнен в АЦ ИВиС ДВО РАН потенциметрическим, объемным, колориметрическим и атомно-абсорбционным методами (аналитики Сергеева С.В., Шульга О.В.). Fumarольные газы отбирались в отдельные вакуумированные барботеры по стандартной мето-

дике [7]. Анализ фумарольных газов выполнен в ИВиС ДВО РАН (аналитики Шапарь В.Н., Тимофеева И.Ф.).

В 2009 г. на этих же площадках было проведено геофизическое зондирование с целью выявления структуры подводящих каналов термальных котлов и фумарол. Идентификация каналов во вмещающих породах заключалась в обнаружении зон с относительно низким удельным электрическим сопротивлением (УЭС): физическими предпосылками стали достаточно контрастные значения УЭС для вмещающих пород выбранных объектов и горячих высокоминерализованных растворов термальных источников [4, 10]. Методика дистанционного зондирования вулканических структур была опробована и отработана [4] на термальных котлах Донного поля вулкана Мутновский. Применялись методы неразрушающего контроля, основанные на контактном и бесконтактном методах зондирования среды: индукционное частотное зондирование (ИЧЗ) аппаратурой ЭМС и электротомография. Комплекс аппаратуры ЭМС [3] и комплекс многоэлектродной электроразведки на постоянном токе «Скала-48» разработаны в Институте Нефтегазовой Геологии и Геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН. Сопротивления пород для интерпретации геоэлектрических структур были заимствованы из литературных данных [4, 9, 10] и сгруппированы следующим образом: 500–10000 Ом·м для неизмененных андезитов, 50–300 Ом·м для гидротермалитов и 0.1–1.0 Ом·м для гидротермального флюида.

На Северо-Восточном поле работы аппаратурой ЭМС выполнялись на площадках с шагом по профилям 1 м. Электротомография проводилась с использованием двух электро-

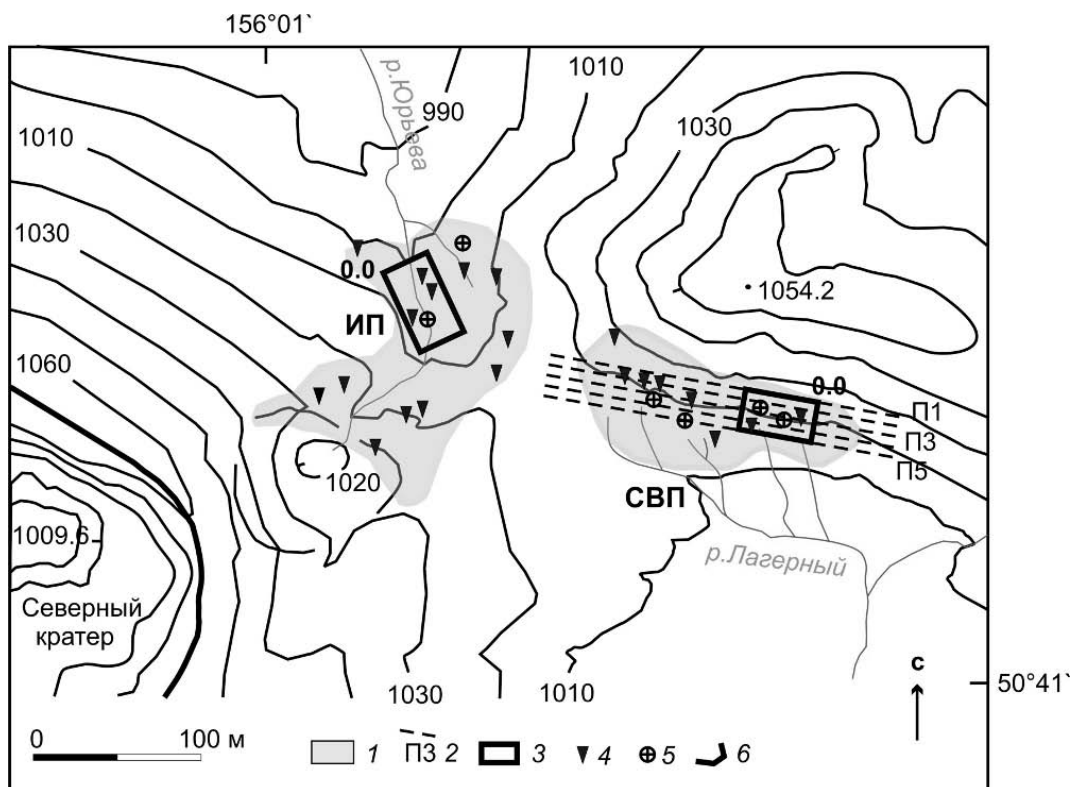


Рис. 1. Схема района работ: 1 – площади термальных полей (ИП – Июльское фумарольное поле, СВП – Северо-Восточное фумарольное поле), 2 – профили электротомографии, 3 – участки ЧЗ (0.0 – начало координат для рис. 4), 4 – крупные фумаролы, 5 – крупные термальные котлы, 6 – бровка кратерного уступа.

разведочных кабелей, общее количество электродов которых равнялось 48. Шаг между электродами для электрических зондирований был выбран максимально возможным и равным 5 м для достижения наибольшей глубины зондирования (до 40 м) при максимальном разnose установки 235 м. Во всех случаях использовались установки Шлюмберже. Участки профилирования указаны на рис. 1. Частотное зондирование аппаратурой ЭМС позволило детализировать общую картину результатов электротомографии.

На Июльском поле было сделано 14 профилей ЧЗ (расстояние между профилями 2 м), шаг по профилям 1 м. Была выбрана рабочая площадка с наибольшим количеством интересных объектов. Профили располагались так, чтобы перепад высот на одном профиле был не более полуметра, что дало возможность пренебречь рельефом без значительного искажения полученных результатов.

Результаты

Гидротермы Северо-Восточного fumarольного поля представлены термальными источниками, котлами со стоком малого дебита или бессточными и парогазовыми струями. Растворы источников и котлов ультракислые (pH = 0–1.37) сульфатно-хлоридные водородно-алюминиевые (рис. 2). Температура воды составляет 85–98°C, минерализация – 11–27 г/л. Для Июльского поля характерны ультракислые (pH = 1.89–2.44) сульфатно-хлоридные алюминиево-кальциевые термы с температурой 18–53°C для ручьев и 88–96°C для термальных котлов. Общая минерализация от 4 до 11 г/л. Суммарный дебит ручьев не более 2 л/с. Химический состав источников Июльского поля отличен от источников Северо-Восточного поля (как ручьев, так и термальных котлов). Анионный состав вод преимущественно сульфатно-хлоридный (рис. 2), но для Июльского поля характерен сдвиг в сторону Cl⁻ и значительное количество F⁻. Преобладающим катионом для растворов термальных котлов Северо-Восточного поля является Al³⁺ при значительном содержании H⁺, растворы Июльского поля образуют компактную группу с большим, чем на Северо-Вос-

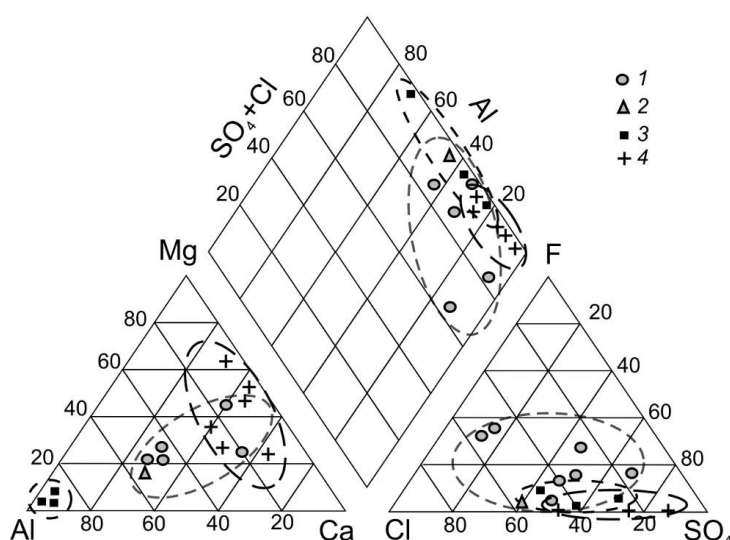


Рис. 2. Химический состав ультракислых вод вулкана Эбеко. Термальные поля: 1 – Июльское (ручьи), 2 – Июльское (котлы), 3 – Северо-Восточное (котлы), 4 – Северо-Восточное (ручьи).

точном поле содержанием (после Al³⁺) Ca²⁺ и Mg²⁺, и занимают промежуточное положение между котлами и источниками Северо-Восточного поля. Общая минерализация источников и котлов Июльского поля меньше Северо-Восточного более чем в два раза.

Основным компонентом fumarольных газов термальных полей является вода, содержание которой колеблется в пределах 97–99 мол.% для Северо-Восточного поля и 90–99 мол.% для Июльского. В сумму вулканических газов в порядке убывания входят также CO₂, SO₂, HCl, H₂S, N₂, O₂, Ar, H₂, CH₄. Первые признаки начинающейся активизации вулкана появились в 2003 г.: в со-

составе газов Северо-Восточного фумарольного поля (рис. 3) стали расти содержания SO_2 , Ar, HCl, H_2S , N_2 , O_2 . Наблюдался рост прогностических отношений газовых компонентов: S/Cl, $\text{H}_2\text{S}/\text{SO}_2$, S/C, $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ [2]. 27 января 2005 г. были зафиксированы первые фреатические взрывы и резко усилилась мощность фумарол в Активной воронке Северного кратера. Летом 2005 г. на внешнем северо-восточном склоне Активной воронки образовалось новое мощное фумарольное поле Июльское, после чего состав газов Северо-Восточного поля вернулся к межэруптивному [6] и оставался стабильным до извержения вулкана 2009 г. В 2005–2008 гг. изменения в составе фумарольных газов происходили уже на поле Июльском, причем изначально наблюдалось значительное относительное содержание SO_2 и HCl (рис. 3). Таким образом, фумарольные газы и растворы гидротерм двух близко расположенных термальных полей имеют существенные различия. Относительное содержание газов группы серы и HCl для Июльского поля значительно выше величин, наблюдаемых когда-либо для Северо-Восточного фумарольного поля. Ранее в [6] рассматривалось отличие фумарол Северо-Восточного и Юго-Восточного полей вулкана Эбеко. В фумаролах южного сектора преобладал HCl, северного – газы группы серы (SO_2 и H_2S). Данный факт объяснялся отсутствием неглубоко расположенного горизонта грунтовых вод, который поглощает наиболее растворимые компоненты газовой смеси, в частности, HCl. Для уточнения структурных особенностей транспорта флюида в приповерхностных условиях было проведено геофизическое зондирование.

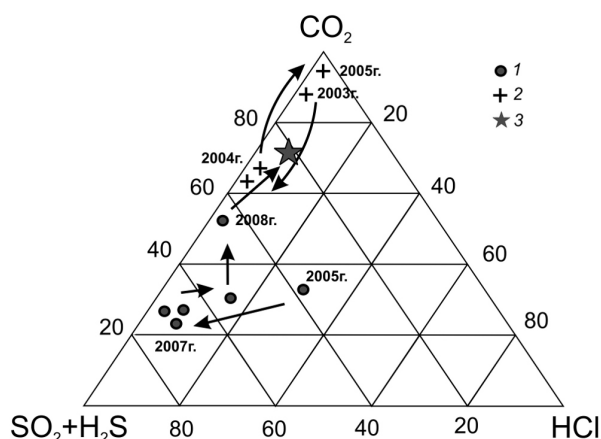


Рис. 3. Изменение химического состава фумарольных газов вулкана Эбеко. Термальные поля: 1 – Июльское, 2 – Северо-Восточное, 3 – эруптивные по [5] и Июльское в феврале 2009 г.

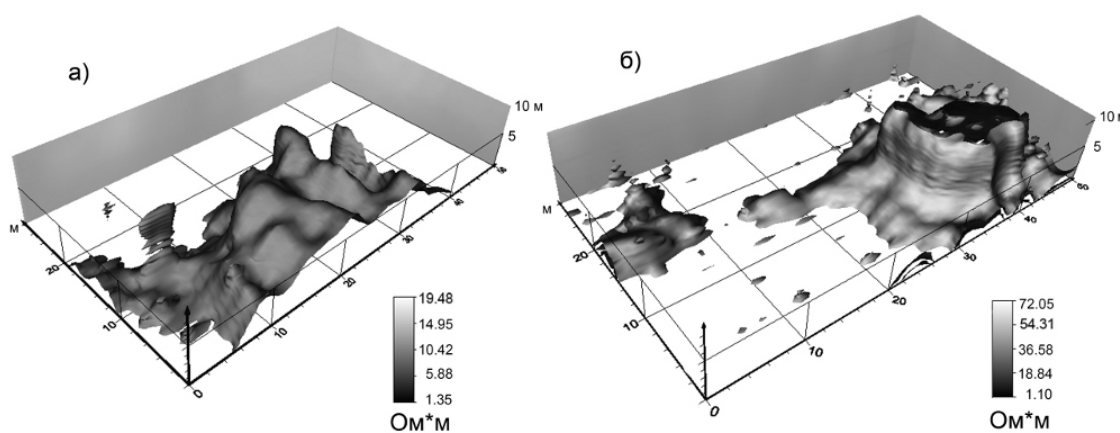


Рис. 4. Изоповерхности кажущегося сопротивления величиной 3.0 Ом*м для Северо-Восточного (а) и 5.0 Ом*м для Июльского (б) полей вулкана Эбеко по данным ЧЗ.

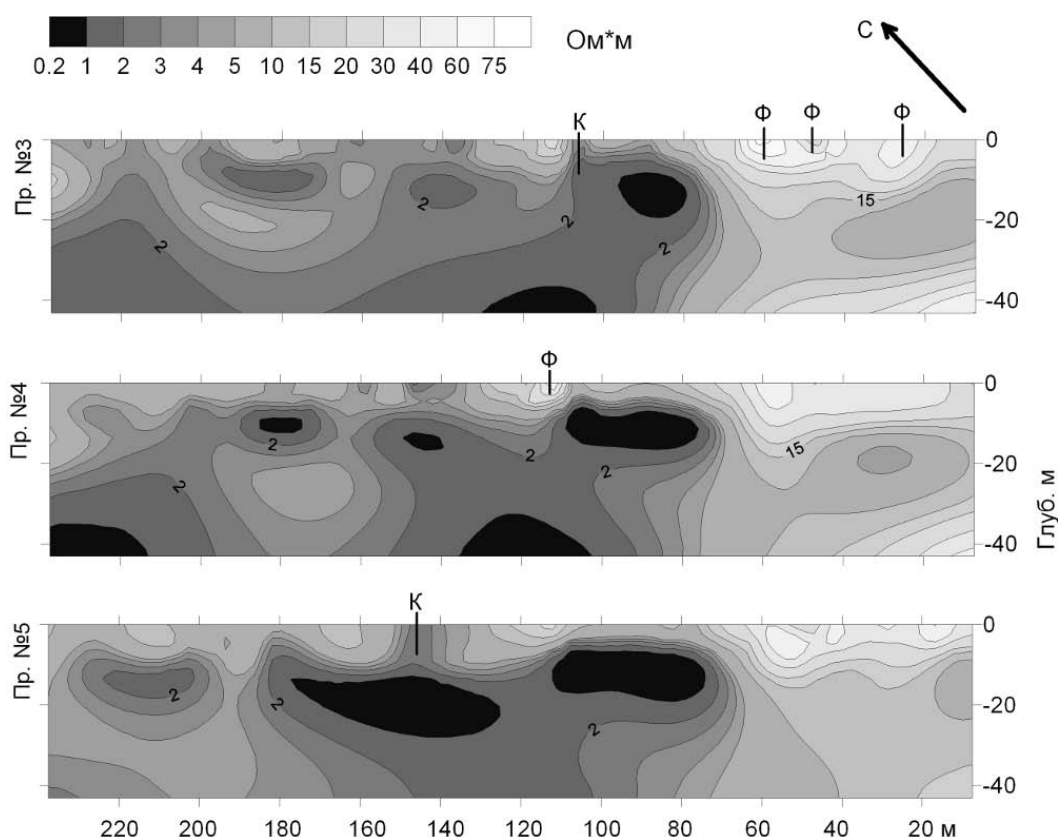


Рис. 5. Результаты инверсии электротомографии для профилей №3–5 для Северо-Восточного фумарольного поля: Ф – крупные фумаролы, К – крупные термальные котлы.

Получены следующие данные: удельное сопротивление грунтов (УЭС) на Северо-Восточном поле колеблется в пределах 0.5–30 Ом·м (данные инверсии электротомографии) и в пределах 1–20 Ом·м (данные трансформации ЧЗ). Наиболее низкое УЭС наблюдается для участков открытых трещинных зон транспорта термальных котлов, где определяется только ионной проводимостью циркулирующего раствора [8] и составляет 0.43–1.4 Ом·м. Затем следуют менее пористые вмещающие породы, величина УЭС (2–16 Ом·м) которых определяется меньшей водонасыщенностью. Максимальные значения УЭС (40–63 Ом·м) наблюдаются в околожерловых участках фумарольных выходов. Величина сопротивления мала и находится на нижней границе значений, характерных для гидротермально измененных пород, что связано с высокой температурой грунтов: температура пород на поверхности во время зондирования составляла 29–45.6°C, в шурфах до глубины 0.5 м наблюдался рост температуры в среднем на 32.9°C. Гидротермальные объекты хорошо выделяются в виде аномалий пониженного УЭС на картах распределения до глубины нескольких метров (рис. 4). Для Северо-Восточного поля по данным ЧЗ выделяется коническая структура подводящих каналов (рис. 4а), которая указывает на близкое расположение гидротермального резервуара, предположительно на глубине 5–8 метров. Эти данные подтверждаются результатами электротомографии (рис. 5), где отчетливо видна конфигурация резервуара, питающего систему котлов.

Для Июльского поля величины УЭС для вмещающих пород по данным ЧЗ составляют от 1 до 75 Ом·м, что в среднем выше в 2.5 раза по сравнению с Северо-Восточным полем: такие сопротивления обусловлены меньшей водонасыщенностью, значительной газовой

составляющей и большим содержанием самородной серы. Поверхность термального поля практически вся бронирована серными потоками. Наименьшие значения УЭС (1–2.1 Ом·м) наблюдаются в канале, питающем термальный котел, они несколько выше, чем на Северо-Восточном поле вследствие меньшей минерализации термальных вод. Для термального котла отслеживается один общий вертикальный подводящий канал (рис. 4б). Его конфигурация позволяет предположить, что питающий гидротермальный резервуар расположен на большей глубине, чем на Северо-Восточном поле. Данные ЧЗ для Июльского поля не дополняются данными электротомографии из-за невозможности достичь удовлетворительного контакта электродов. Плохой контакт переходных заземлений привел к полной отбраковке данных электротомографии.

Заключение

Для исследования внутренней структуры различных по химическому составу объектов термальных полей активного вулкана Эбеко были применены методы постоянного тока и частотного зондирования. Полученные данные подтверждают существующие представления о структуре верхней части разреза Северо-Восточного поля: подтверждено наличие близко расположенного гидротермального резервуара, для Июльского поля подобный объект не установлен. Отсутствие на Июльском поле приповерхностного буфера на пути потока гидротерм ведет в числе других причин к отличию состава его термальных вод и фумарольных газов от проявлений Северо-Восточного поля. В частности, поглощение водами поверхностной циркуляции HCl приводит к дефициту Cl⁻ в фумарольных газах Северо-Восточного поля и обогащению данным ионом термальных вод. В результате газы фумарол Июльского поля более близки по составу к первичным глубинным гидротермам.

Авторы благодарны за помощь в организации и проведении полевых работ и интерпретацию результатов А.К. Манштейну, С.Б. Бортниковой, С.Н. Рычагову, Д.Ю. Кузьмину, Е.В. Балкову.

Полевые исследования выполнены при поддержке межрегионального проекта СО РАН ДВО РАН № 96 и гранта РФФИ № РФФИ-09-05-011-38-а

Список литературы

1. *Аверьянов И.П.* Баланс серы в поствулканическом процессе и проблемы промышленного серонакопления. М.: Наука, 1981. 169 с.
2. *Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н.* Активизация вулкана Эбеко в 2005–2006 гг. (остров Парамушир, Северные Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. с. 3–13.
3. *Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю.* Аппаратура частотного электромагнитного зондирования „ЭМС“ // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 6. с. 571 – 579.
4. *Манштейн Ю.А., Бортникова С.Б., Манштейн А.К. и др.* Особенности строения проводящих каналов термальных источников вулкана Мутновский (Южная Камчатка) // Докл. АН. Геофизика. 2008. Т. 423. № 3. с. 383–388.
5. *Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А.* Активность вулкана Эбеко в 1987–1991гг.; характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5–6. с. 21–33.

6. *Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н.* Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко // *Вулканология и сейсмология.* 1988. № 4. с. 21–36.
7. *Никитина Л.П., Меняйлов И.А., Шапарь В.Н.* Модифицированные методы отбора и анализа фумарольных газов // *Вулканология и сейсмология.* 1989. № 4. с. 3–15.
8. *Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры. Дубна, Изд-во ун-та Дубна. 1997. 194 с.
9. *C. Bernstone, T. Dahlin, T. Ohlsson, W. Hogland.* DC-resistivity mapping of internal land-fill structures: two pre-excavation surveys // *Environmental Geology.* Vol. 39. 2000. № 3–4. p. 360–368.
10. *Caglar I., Demiroerer M.* Geothermal exploration using geoelectric methods in Kestanbol, Turkey // *Geothermic.* Vol. 28. 1999. p. 803 – 819.