

ГЛУБИННОЕ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ТЕРРИТОРИИ КАНЕВСКОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА

И.М. Логвинов, В.В. Гордиенко
Институт геофизики НАН Украины

Существует только три геофизических метода, позволяющие исследовать мантию Земли *in situ*: сейсмический, гравитационный и геоэлектрический. Геоэлектрические исследования направлены на выявление аномалий проводимости, связанных с тектоническими процессами в недрах Земли и обусловленных ими месторождений полезных ископаемых. В процессе выполнения исследований рассматриваются изменения удельного электрического сопротивления (у.э.с., ρ), обусловленные минеральным составом горных пород, мерой заполнения пор пород водой и флюидами, вариациями агрегатного состояния пород под действием повышенных температур и давления. В работе приводится модель распределения у.э.с. (геоэлектрическая модель) в районе Каневского природного заповедника (рис.1) для глубин земной коры и мантии.

Интерес к этому региону возрос в последние годы в связи с обнаружением повышенного теплового пото-

ка (Днепровская аномалия теплового потока – ДА (Гордиенко и др., 2002)) в полосе, протягивающейся от Киева до Черкасс (рис. 1). Максимальные значения теплового потока (ТП) в пределах аномалии составляют 60–65 мВт/м², т.е. ее параметры типичны для возмущений глубинного ТП в зонах современной активизации Украины (Гордиенко и др., 2002). Разные варианты объяснения аномалии ТП ведут к предположениям о наличии в настоящее время в земной коре слоя, содержащего расплав и флюиды, что должно сопровождаться понижением ρ в пределах источника аномалии.

Дальнейшие исследования показали, что в этом районе наблюдаются и другие геолого-геофизические данные, указывающие на аномальность района. В частности, именно здесь отмечаются большие, чем восточнее и западнее, значения амплитуд поднятий поверхности Земли за последние 3 млн. лет (рис. 1), обнаружены проводящие объекты в земной коре (Гордиенко и др., 2005).

Установленные значения глубинного ТП характеризуют территорию Днепровской аномалии ТП как перспективную для практического использования тепла Земли – нового экологически чистого источника энергии. В условиях склона Украинского щита (УЩ) тепловому потоку (ТП) 48–49 мВт/м² отвечает плотность геотермальных ресурсов 2 т.у.т./м² (т.у.т. – тонна условного топлива), 58–59 мВт/м² – 3 т.у.т./м². При минимальной рентабельной величине плотности геотермальных ресурсов (когда стоимость геотермальной энергии не превышает стоимости энергии, получаемой при сжигании традиционного топлива) 2,5 т.у.т./м² при глубине скважин до 6 км средняя плотность ресурсов в пределах аномалии составляет 2,7 т.у.т./м², а в отдельных районах может быть заметно больше (3–3,5 т.у.т./м²). При бурении до 3 км возможно рентабельное получение тепла для отопления (с температурой добываемой воды более 60°C), но его концентрация существенно ниже – 0,6 т.у.т./м².

Наиболее изученные части ДА располагаются на северном и южном краях аномалии ТП. Район Канева находится в средней части аномалии и является слабо изученным.

Приведенные в работе геоэлектрические данные получены на основе интерпретации результатов зондирования с использованием вариаций естественного электромагнитного поля Земли, источники которых находятся в ионосфере или магнитосфере Земли. Глубина проникновения поля ($\delta = \lambda / 2\pi$) зависит от периода (Т) вариаций, поэтому для исследования Земли от поверхности до глубин несколько сотен километров при-

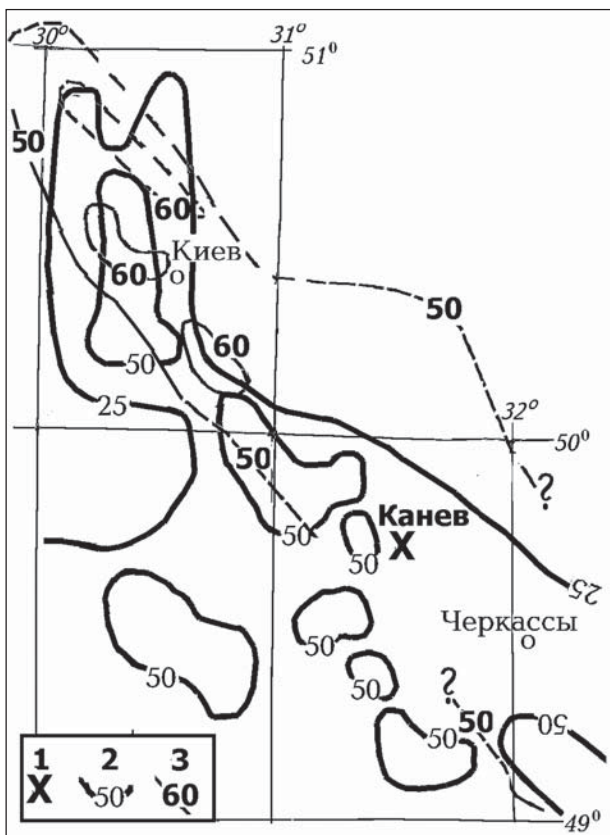


Рис.1. Расположение Днепровской аномалии.

1 - пункт ГМТЗ Канев (КНВ).

2 - изолинии теплового потока в мВт/м².

3 - амплитуды поднятий поверхности Земли (мм) за последние 3 млн. лет.

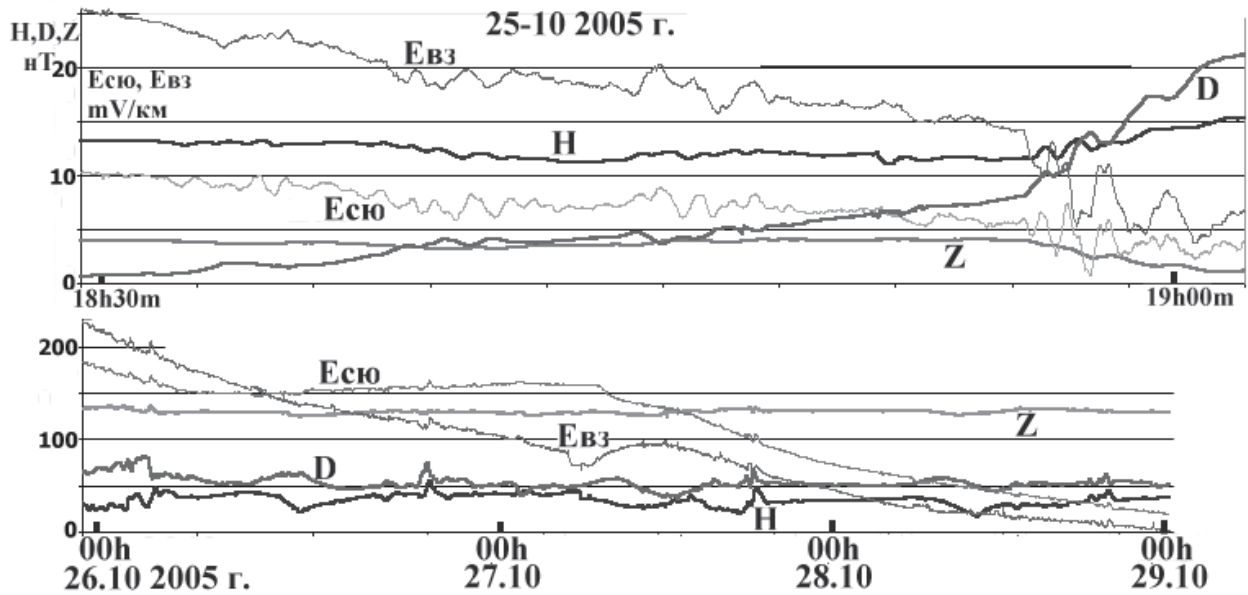


Рис. 2. Вариаций естественного магнитотелурического поля, зарегистрированные на территории Каневского природного заповедника.

Компоненты МТ поля: магнитные – Н (вдоль магнитного меридиана), D, Z (вертикальная); электрические – $E_{сю}$, $E_{вз}$.

ходится использовать вариации поля от долей секунды до многолетних (миллионы секунд). Электромагнитное поле длиннопериодных вариаций охватывает большой объем Земли, который характеризуется длиной волны в слое ($\lambda = \sqrt{10\rho T}$, где λ – в км, ρ – в Ом·м, T – период в с), т.е. полученный для данного пункта результат должен рассматриваться для объема пород пропорционального используемой длине волны.

Экспериментальные данные

В период с 25.10 по 02.11.2005 г. на территории Каневского природного заповедника было выполнено глубинное магнитотеллурическое зондирование (ГМТЗ) на основе регистрации пяти компонент магнитотеллурического (МТ) поля цифровой магнитоэлектрической станцией производства ИГФ Польской АН. На рис. 2 приведены примеры записи с различным шагом считывания регистрируемого МТ поля.

В результате обработки наблюдений по принятой методике (Гордиенко и др., 2005) были получены: а) значения матрицы импедансов МТ поля, б) магнитовариационные параметры.

Глубинные магнитотеллурические зондирования в п. Канев (КНВ). Наиболее достоверный результат МТЗ получается в направлении (главное направление), где соотношение основного и дополнительного импедансов принимает наибольшие значения. Азимут главного направления в КНВ (соотношение основного и дополнительного импедансов достигает 4–8) изменяется мало ($25\text{--}30^\circ$) для диапазона периодов 4–8600 с, величина параметра неоднородности изменяется в пределах 0,1–0,3, что указывает на близость региона к двумерной структуре. Полученное главное направление перпендикулярно простиранию ДА. Применение различных методик обработки позволили построить

амплитудную и фазовую кривые ГМТЗ в главном направлении матрицы импедансов в диапазоне периодов от 20 с до 8600 с.

Вблизи КНВ известны МТЗ (рис. 3), выполненные производственными организациями Украины в диапазоне периодов от долей секунды до 900 с (Ингерев и др., 1987; Трегубенко и др., 1989, 1994). Сопоставление этих данных с полученными нами возможно толь-

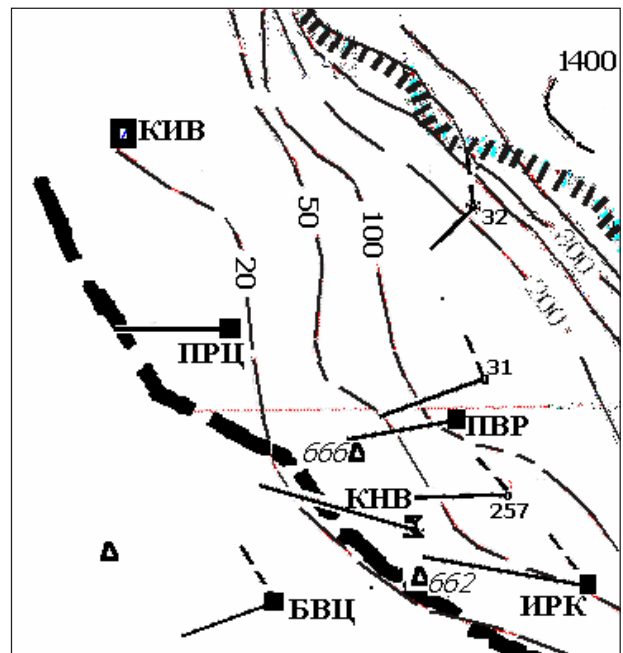


Рис. 3. Геоэлектрические данные в окрестностях ГМТЗ Канев.

1 - пункты наблюдений МТ поля (а - ИГФНАНУ; б - по: Ингерев и др., 1987; в - по: Трегубенко и др., 1989, 1994). 2 - индукционные стрелки для периода 1000 с. 3 - изолинии S_{on} (Логвинов, 2002). 4 - границы Украинского щита (УЩ). 5 - границы Днепровского-Донецкого рифта (ДДР).

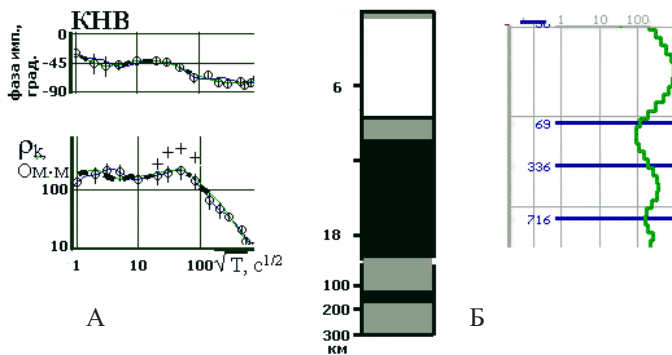


Рис. 4. Сопоставление результатов 1D инверсии и интерпретационной кривой в п. КНВ – А. 1 – экспериментальные, 2 – редуцированные значения, 3 – результаты инверсии OCCAM. Геоэлектрический разрез в районе КНВ по данным 1D инверсии – Б. Значения сопротивлений: 4 – менее 140, 5 – 140–400, 6 – более 400 Ом-м.

ко для п. 666 (Ингеров и др., 1987) и 257 (Трегубенко и др., 1989), где азимуты измерительных линий (30°) близки к главному направлению, полученному в КНВ. Оказалось, что и амплитудные, и фазовые кривые в перекрывающемся диапазоне периодов (20–900 с) совпадают в пределах погрешности определений. Поэтому для дальнейшей интерпретации была построена обобщенная кривая ГМТЗ, где для периодов 1–16 с были взяты средние значения для п. 666 и 257, а на больших периодах данные в п. КНВ.

1-D инверсия. Обобщенная кривая ГМТЗ в диапазоне от 1 до 8600 с в п. КНВ была совмещена с кривой зондирования по данным региональных МВЗ на геомагнитной обсерватории Киев, полученной с использованием поля: Sq-вариаций (Olsen, 1998) для периода полусуточной (43 200 с) и суточной вариаций (86 400 с); Dst-вариаций, в диапазоне периодов от 320 000 до 44 930 000 с (3,7 – 520 суток) (Semenov, 1998). Эта кривая в диапазоне периодов от 1 до 44 930 000 с была взята в качестве интерпретационной.

Подбор параметров геоэлектрического разреза в окрестностях п. КНВ основывался на одномерной (1-D) инверсии интерпретационной кривой. Для этой цели использовались инверсии Паркера (Parker, Whaler, 1981) (D+ алгоритм) и OCCAM (Constable et al., 1987). Первым методом можно оценить значение суммарной продольной проводимости проводников, выделяемых в разрезе, по данным во всем наблюдаемом диапазоне периодов одновременно. Второй заключается в подборе плавно изменяющихся по проводимости конечном числе слоев, аппроксимирующих экспериментальные данные. Инверсия OCCAM более чувствительна к значениям фаз импеданса, в то время как инверсия D+ – к значениям ρ .

На рис. 4а приведены результаты 1-D инверсии двумя указанными методами. Как видно из рисунка, в целом совпадение расчетных и экспериментальных данных хорошее в диапазоне 1-200 с. На больших периодах амплитудные данные завышены на постоянную величину, тогда как фазы импеданса согласуются во всем диапазоне периодов. Этот факт свидетельствует о гальваническом искажении амплитудных данных в диапазо-

не периодов 400–8600 с. Действительно, после редукиции амплитудной интерпретационной кривой до согласования с данными МВЗ, обе инверсии полностью согласуются с экспериментальными данными.

На геоэлектрическом разрезе (рис. 4б), полученном в результате инверсий, выделены слои (проводники), сопротивление которых намного меньше вмещающих слоев. Один из слоев расположен в земной коре в интервале глубин 10–19 км и имеет значение S около 400 См. Этот слой по глубине расположен между проводниками, которые получены при двумерной интерпретации вдоль профиля в северной части ДА (Гордиенко и др., 2005). Вторым – расположен в верхней мантии в интервале глубин 130–160 км и имеет значение S около 700 См.

Магнитовариационные параметры. В

результате обработки вариаций магнитных компонент (Z, H, D) МТ поля на отдельном пункте с использованием линейного соответствия $Z = W_{zh} H + W_{zd} D$, были определены реальные ($C_u = \text{Re}W_{zh} + \text{Re}W_{zd}$) и мнимые ($C_v = \text{Im}W_{zh} + \text{Im}W_{zd}$) индукционные стрелки (положительные значения азимута стрелок откладываются от направления на север по часовой стрелке). Значения стрелок определены в диапазоне периодов 9–10 000 с (погрешность составила 0,02–0,04 и 3^0 – 5^0 , соответственно для модулей и их азимутов). Период максимума частотной характеристики (T_m) реальных индукционных стрелок приходится на интервал 900–1600 с и достигает величины 0,38–0,36. В этом же интервале периодов величина C_v в 4–7 раз меньше C_u , а азимут C_v резко изменяется (до 180^0) при переходе в область периодов больших T_m . Азимут C_u в диапазоне периодов 50–5 000 с составляет 278 – 286^0 .

Между проводящими объектами и геометрией магнитовариационных аномалий существуют соотношения, определяемые законом Био-Савара. Над средней частью проводника, вытянутого вдоль оси x (двумерная модель), модуль параметра $W_{zy} = H_z/H_y$ близок к нулю и имеет экстремумы слева и справа от проекции краев проводящего объекта на земную поверхность. Расстояние между экстремумами растет с увеличением глубины залегания проводника. Реальная часть W_{zy} меняет знак и имеет минимум слева и максимум справа относительно середины проводника. Поэтому при близком (по латерали или вертикали) расположении проводников в связи с суперпозицией поля указанные выше соотношения для параметра W_{zy} могут сильно изменяться.

Согласно карте суммарной продольной проводимости осадочных пород (S_{on}) территории Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) и северных склонов УЩ (Логвинов, 2002), максимальные значения S_{on} наблюдаются в наиболее глубокой части ДДВ в пределах рифта – ДДР (рис. 3). В соответствии с этим значения на бортах ДДР C_u и C_v должны достигать максимума и иметь направления от оси ДДВ (т.е. на юз). При наличии проводящих неоднородностей, не связанных с ДДР, вектора индукции будут претерпевать изменения. Рассмотрим эти изменения в предположении существования ДА.

В результате суперпозиции аномальных полей от ДА и ДДР реальные вектора индукции должны отклоняться от юго-западного направления (максимальное отклонение должно наблюдаться в диапазоне T_m для ДА) в пунктах северо-восточнее оси ДА. В пунктах юго-западнее оси ДА азимут C_u снова может вернуться к юз направлению в связи с близким простирания ДА и ДДР.

В работах В.И. Трегубенко с соавторами (1989, 1994) приведены значения C_u и C_v в пунктах наблюдений только для периодов 150 и 1000 с, поэтому анализ проведен для периода, соответствующего T_m (т.е. для 1000 с). Из рис. 3 видно, что указанные признаки отмечаются на всех пунктах, расположенных вдоль профиля проходящего через КНВ и перпендикулярного простирания ДА и ДДР. На п.32 C_u перпендикулярно изолиниям $S_{оп}$, с приближением к ДА азимут C_u отклоняется к северу. Максимальное отклонение отмечается на п. ИРК, КНВ, ПРЦ (на которых азимут C_u становится большим 270°), расположенных в пределах ДА. При удалении от ДА к ю-з (п. БВЦ) видно возвращение направления C_u к тому, что наблюдалось на пунктах, расположенных на склонах ДДВ (п. 31).

Таким образом, приведенные магнитовариационные данные подтверждают результат МТЗ о наличии проводящего объекта, пространственно коррелирующего с Днепровской аномалией теплового потока.

Обсуждение

Впервые для всего региона от Киева до Черкас определены геоэлектрические параметры земной коры и верхней мантии на основе современных методов обработки и интерпретации данных, полученных цифровой станцией.

Приведенный на рис. 2б геоэлектрический разрез района Канева, конечно, нельзя считать окончательным. Во-первых, как отмечалось выше, распределение параметров ДА больше соответствует не одномерной, а двумерной модели. Во-вторых, кривые МТЗ, выполненные производственными организациями, построены только до периодов 900 с, что недостаточно для корректного построения двумерной модели.

Дальнейшие геоэлектрические исследования предполагается сосредоточить на профиле, проходящем

через Канев и пересекающем ДА и ДДР. Определение теплового потока в районе Канева (что важно, в частности, для оценки геотермических ресурсов) затруднено отсутствием глубоких скважин. Но его можно провести, используя данные местной метеостанции о вариациях температуры почвы за несколько лет и результатов длительного (в течение нескольких месяцев) измерения температуры в неглубокой скважине (5–7 м) (Гордиенко и др., 2002).

В заключение авторы выражают искреннюю признательность директору Каневского природного заповедника М.Г. Черному, без активной поддержки которого работа не была бы выполнена. В связи с опытом работ на территории Каневского заповедника целесообразно было бы организовать подобные магнитотеллурические исследования и в других основных заповедниках Украины.

Литература

- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Усенко О.В. (2002): Тепловое поле территории Украины. К.: Знание Украины. 1-170.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н. (2005): Днепровская аномалия теплового потока и электропроводности. - Геофиз. журн. 27 (4): 597-610.
- Ингертов А.И., Бугримов Л.П., Рокитянский И.И., Колдунов А.А. (1987): Результаты региональных исследований МТЗ по изучению глубинного строения юго-восточной Украины. К.: Геоинформ. 1-275.
- Логвинов И.М. (2002): Карта суммарной продольной проводимости осадочного чехла Днепровско-Донецкой впадины по результатам двумерного моделирования электромагнитных данных. - Физика Земли. 11: 94-96.
- Трегубенко В.И., Финчук Л.Л., Белошапская Н.В. (1989): Результаты региональных работ методом МТЗ северо-западной части УССР. Киев: УТГФ. 1-130.
- Трегубенко В.И., Мегедь Г.В., Горняк З.В., Василенко В.А. (1994): Результаты площадной съемки МТЗ м-ба 1:2500000 в западной части Украины. Киев: Геоинформ. 1-210.
- Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. (1987): Occam's inversion: a practical algorithm for the inversion of electromagnetic data. - Geophysics. 52: 289-300.
- Olsen N. (1998): The electrical conductivity of the mantle beneath Europe derived from C-responses from 3 to 720 hr. - Geophys. J. Int. 133: 298-308.
- Parker R.L., Whaler K.A. (1981): Numerical method for establishing solution to the inverse problem of electromagnetic induction. - J. Geophys. Res. 86: 9574 - 9584.
- Semenov V.Yu. (1998): Regional conductivity structures of the Earth's mantle. - Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. C-65 (302): 1-122.