



УДК 550.837.211:477.41

© 2008

Б. Т. Ладанівський, І. М. Логвінов, В. Н. Тарасов

Геоелектрическая 2D модель вдоль профиля Сарата — Кельменцы

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

The geoelectrical cross section along the profile Sarata–Kelmensy was obtained for the first time by REBOOC and IGF Polish AS code. The conductive objects with resistivity less than 10 Ohm·m explaining the Carpathian anomaly of conductivity are sited under the Folded Carpathians in an interval of depths of 2–18 km. The integrated conductivity of those objects was estimated about $(1.8-2.3) \cdot 10^8 S \cdot m$.

Первые измерения компонент электромагнитного поля аналоговой аппаратурой в исследуемом регионе были выполнены сотрудниками ИГФ НАН Украины в 1973 г. [1] и затем в 1991 г. [2]. В 1980–1990 годах на территории Карпат производственными организациями Мингео СССР под руководством А. И. Ингерова и В. И. Трегубенко с помощью цифровых станций ЦЭС выполнены наблюдения магнитотеллурического (МТ) поля более чем в 100 пунктах [3–5]. В работе [6] приведена интерпретация данных, полученных в [3] для всего Карпатского региона, сгруппированных по геолого-тектоническим зонам.

В настоящей работе приведены результаты двумерного (2D) моделирования вдоль профиля (рис. 1), пересекающего Карпатский регион и выходящего на Украинский щит (УЩ). Для интерпретации использовались полученные авторами магнитовариационные данные и кривые магнитотеллурических зондирований (МТЗ); результаты МТ исследований последних лет [7], а также кривые МТЗ [3–5].

Экспериментальные данные (магнитовариационные). Авторами были оцифрованы осциллограммы аналоговых наблюдений предыдущих лет в четырех пунктах и определены реальные (C_u) и мнимые (C_v) индукционные стрелки в диапазоне периодов от 100 до 10000 с. В работе [7] представлены значения C_u и C_v в пятнадцати пунктах, пересекающих северную часть Предкарпатского прогиба (ПП), Вольно-Подольскую плиту (В-ПП) и выходящих на УЩ, для диапазона периодов 50–10000 с. Погрешность определения перечисленных данных составляет 0,01–0,03 и 3–6° для модулей и азимутов соответственно. В двумерных ситуациях C_u и C_v — коллинеарны, когда азимут C_v обращается в ноль, изменяя при этом свое направление на противоположное с возрастанием периода, C_u достигает

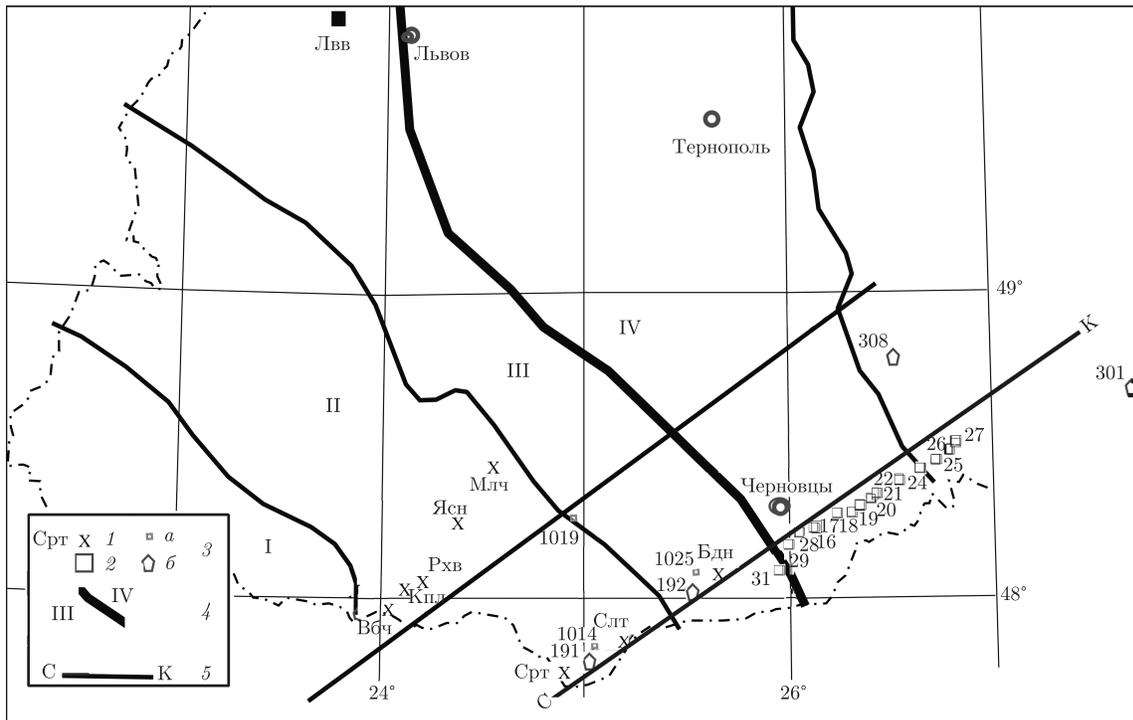


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений: 1 — по данным авторов; 2 — по данным работы [7]; 3: *a* — по данным работы [3], *b* — по данным работ [4, 5]; Срт — Сарата, Слт — Селятин, Бдн — Буденец; 4 — границы тектонических регионов. Складчатые Карпаты — I, Предкарпатский прогиб — II, Вольно-Подольская плита — III, Украинский щит — IV; 5 — линия профиля моделирования Сарата — Кельменецы

максимального значения на некотором периоде T_x (называемом характерным). Значение T_x для C_u в пунктах, расположенных в Карпатском регионе, приходится на интервал периодов 900–1600 с, сдвигаясь в область 600 с при переходе к В-ПП и 200 с на УЩ. Азимут C_u изменяется от 0° до $60\text{--}80^\circ$ при переходе от юга Складчатых Карпат (СК) до УЩ в диапазоне периодов от 50 до 600 с, тогда как на периодах, больших 1000 с, азимут изменяется от 10° до $20\text{--}25^\circ$.

Поведение C_u и C_v (соответствие максимумам C_u минимумов C_v ; направление C_v совпадает с C_u на периодах до T_x и меняется на противоположное на больших периодах) характерно для двумерных проводящих структур, что позволяет использовать аппарат двумерного численного моделирования для построения геоэлектрической модели вдоль профиля.

Данные магнитотеллурических зондирований. В работе [7] приведены результаты МТЗ в диапазоне периодов от 5 с до 6000–10000 с, полученные в результате наблюдений цифровой станцией с использованием современных методов оценки матрицы импедансов. Кривые МТЗ, полученные с применением тех же методических приемов, имеются и в пунктах Бдн и Шшк, где авторами были оцифрованы результаты наблюдений в 1991 г. аналоговой станцией. В настоящей работе для интерпретации используются значения амплитуд и фаз импеданса, определенные в главных направлениях (Аз 120°), т. е. в тех направлениях, в которых основной импеданс в несколько раз превосходит дополнительный. Погрешность определения сопротивления и фазы в большинстве случаев не превышает 10%. Оценка степени горизонтальной неоднородности среды производилась по параметру skew. Считается, что

значения $skew > 0,3$ свидетельствуют о трехмерности среды. Полученные частотные зависимости этого параметра дают значения $skew$ от 0,1 до 0,6 во всем исследованном диапазоне периодов. Анализ показывает, что увеличенные значения $skew$ быстрее отражают качество экспериментального материала, чем внутреннее строение Земли.

Результаты работ, опубликованные в [3–5], представлены в виде амплитудных и фазовых кривых МТЗ в диапазоне периодов от 0,5–1 с до 625–2500 с по направлениям измерительных линий, которые ориентировались вдоль (x) простирания Карпат и в перпендикулярном (y) направлении. Поскольку главное направление матрицы импедансов, как указано выше, совпадает с простиранием Карпат, нами были рассмотрены кривые МТЗ в четырех пунктах Карпатского региона (см. рис. 1). Кривые ρ_{xy} в пунктах 191 и 1014 подобны по форме, но сильно отличаются по сопротивлениям, тогда как фазовые кривые практически совпадают (за исключением кривой xy в п. 1014). Кривые ρ_{xy} в пунктах 192 и Бдн подобны по форме, близки по сопротивлениям и по фазам, тогда как данные по п. 1025 сильно отличаются от них особенно на периодах, меньших 60 с. Амплитудно-фазовое согласие в п. 1014 очень плохое. Учитывая все это для дальнейшей интерпретации взяты только кривые в п. 191 и совмещенная кривая в пунктах 192 и Бдн.

Двумерное моделирование. В работе применены два метода двумерной инверсии МТ данных — ИГФПАН [8] и REVOOC [9]. Основные особенности этих методов и принципы их применения даны в работе [10].

При моделировании по программе ИГФ ПАН невязки модельных и экспериментальных значений считались удовлетворительными (т. е. в рамках тройной погрешности определения МТ параметров), если они не превышали: для магнитных параметров 0,1, для фаз 10° , для сопротивлений 30 %. При использовании метода REVOOC стремятся получить среднеквадратическую невязку по всем периодам и точкам между модельными и экспериментальными данными (rms), близкую к 1 (обычно $rms < 2$ считается удовлетворительной).

Были взяты проекции C_u и C_v на линию профиля и кривые МТЗ в направлении 120° (продольные по отношению к Карпатам). При интерпретации МТЗ оценивалась мера согласия между амплитудными и фазовыми данными. Известно, что гальваническое искажение МТ-поля приводит к статическому смещению амплитудных кривых МТЗ, которое выражается в параллельном сдвиге кривых ρ_k . Для исключения этого эффекта кривые МТЗ нуждаются в нормализации. Практически нормализация амплитудных кривых МТЗ заключается в их смещении (нормировании) по вертикали до совмещения с кривой ρ_k , соответствующей региональному геоэлектрическому строению района исследований.

Учет гальванического искажения для каждой из программ моделирования осуществлялся методически по-разному. Для моделирования по программе ИГФ ПАН оценка гальванических искажений производилась с использованием одномерной инверсии. Для этого выбранные кривые МТЗ были совмещены с кривой зондирования, полученной на основе регионального магнитовариационного зондирования (МВЗ) по данным Sq- и D_{st} -вариаций для геомагнитной обсерватории Львов [11]. Практически во всех пунктах ГМТЗ их фазовые кривые хорошо согласуются с фазой МВЗ. Одновременно в большинстве пунктов отмечается влияние гальванического эффекта. Для дальнейшего двумерного моделирования были взяты нормированные значения ρ_k . В программе REVOOC гальванические искажения учитывались аналогичным образом автоматически.

Подбор моделей по программе ИГФ ПАН осуществлялся таким образом, чтобы выполнялись следующие условия: количество блоков модели не превышает произведения числа пунктов на число параметров; максимальные геометрические параметры составных час-

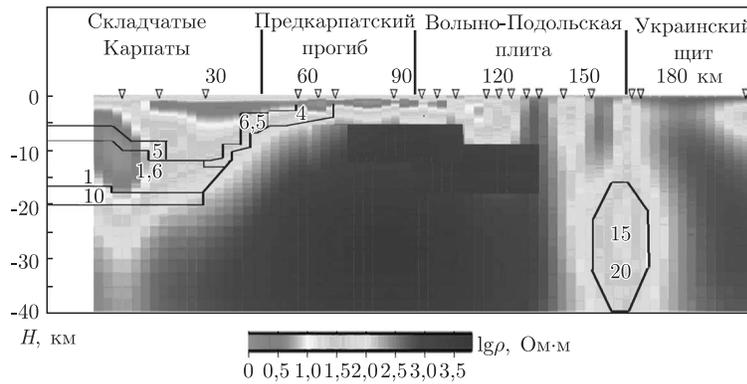


Рис. 2. Геоэлектрический разрез вдоль профиля (внутри элементов модели цифрами указаны их сопротивления в Ом · м). Жирными линиями показаны элементы модели по программе ИГФ ПАН

тей модели с постоянным сопротивлением; максимально возможное сопротивление блоков модели.

По оси x шаг моделирования составлял 3 км на участке профиля, где имелись экспериментальные данные. По вертикальной оси шаг моделирования составлял 100–200 м для верхних 2000 м, 400–800 м до глубин 12 км и 1–2 км до глубины 26 км. При подборе параметров учитывалось в первую очередь согласие модельных и экспериментальных данных в диапазоне периодов T_x , для которых условие двумерности модели выполняется наилучшим образом.

Спецификой методики моделирования в работе был учет априорной информации. К такой информации относится: геоэлектрические параметры земной коры и верхней мантии, согласно данным одномерной инверсии, обобщенной кривой зондирования в обсерватории Львов [11]; геометрические параметры распределения осадочных пород, согласно геологическому разрезу [12]. Все указанные данные были закреплены в обеих программах и на их фоне искалось распределение геоэлектрических параметров.

Особенности поведения параметров МТ-поля как вдоль профиля, так и по частоте хорошо объясняются моделью, приведенной на рис. 2. Невязки: для C_u и C_v во всех пунктах и фаз импедансов на участке пк65–170 не превышают двойной погрешности определения параметров; для сопротивлений на этом же участке не превышают 20%.

Обсуждение результата. Как видно из рис. 2, модели, полученные двумя методами инверсии, имеют отличия, хотя приблизительно одинаково удовлетворяют экспериментальные данные. Эти отличия отражают меру неоднозначности решения обратной задачи, связанной с приданием большего веса тому или иному интерпретационному параметру. В программе REVOOC большее внимание придавалось данным МТЗ, в программе ИГФ ПАН — магнитовариационным параметрам.

Комплексирование двух методов моделирования позволило оптимально сократить количество блоков модели для программы ИГФ ПАН. Кроме того, возможности программы ИГФ ПАН позволили проверить гипотезу о связи проводящих осадков ПП с глубинным проводящим объектом КАЭ, тогда как программа REVOOC имеет плохую разрешимость по отношению к выделению тонких вертикальных объектов.

Аномальное поведение всех параметров (обусловленных КАЭ) максимально проявляется на отрезке пк0–60. В этом интервале амплитуда изменения фазы импеданса составляет около 45° на периоде 100 с, значения кажущегося сопротивления уменьшается в 1,5–3 ра-

за на периодах 100–600 с, наблюдается разворот на 180° значений C_u , C_v и максимальные значения C_u на периодах 600–1600 с. Глубинные объекты с сопротивлением, меньшим $1,6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, в основном объясняющие такое поведение параметров, располагаются на участке пк24–27 в интервале глубин 8–18 км. Интегральная проводимость этих объектов (т. е. КАЭ) $G = \sum \sigma \cdot l \cdot h$ [13] (σ , l , h — соответственно, электропроводность, ширина и мощность отдельных элементов объекта) составляет порядка $2,3 \cdot 10^8 \text{ См} \cdot \text{м}$ для модели программы ИГФ ПАН и $1,8 \cdot 10^8 \text{ См} \cdot \text{м}$ для программы REVOOC. Интересной особенностью модели REVOOC является продолжение проводящих осадков от ПП под СК до пк8, причем суммарная продольная проводимость этого объекта достигает 1000 См .

О распределении проводимости в разных частях Предкарпатского прогиба (пк55–100) судить трудно, так как экспериментальные данные на территории прогиба распределены неравномерно. Породы с сопротивлением, менее $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, залегают до глубин 2,5–3 км на всем пересечении профиля прогиба.

Далее сопротивление и суммарная продольная проводимость осадочных пород уменьшается, особенно сильно северо-восточнее пк110. Как и ранее в работе [7], обе программы моделирования допускают существование глубинного проводящего объекта в интервале пк150–165 на глубинах 15–40 км, G которого составляет около $10^7 \text{ См} \cdot \text{м}$.

1. *Rokityanskiy I. I., Kulik S. N., Logvinov I. M., Shuman V. N.* The electric conductivity anomaly in the Carpathians // *Acta Geodaet. Geophys. Mont.* – 1975. – **10**, No 3. – P. 277–286.
2. *Гордиенко В. В., Бурахович Т. К., Завгородняя О. В. и др.* Тектоносфера южного Прикарпатья // *Геофиз. журн.* – 1994. – **16**, 2. – С. 45–56.
3. *Ингеров А. И., Бугримов Л. П., Рокитянский И. И., Колдунов А. А.* Результаты региональных исследований МТЗ вдоль геотраверсов Ужгород-Ворошиловоград и Армашат-Ахалцихе с целью изучения глубинного строения земной коры. – Киев: Геоинформ, 1987. – 275 с.
4. *Трегубенко В. И., Финчук Л. Л., Белошапская Н. В.* Результаты региональных работ методом МТЗ северо-западной части УССР. – Киев: Геоинформ, 1989. – 130 с.
5. *Трегубенко В. И., Мегедь Г. В., Горняк З. В., Василенко В. А.* Результаты площадной съемки МТЗ м-ба 1:2500000 в западной части Украины. – Киев: Геоинформ, 1994. – 210 с.
6. *Рокитянский И. И., Ингеров А. И.* Электромагнитные исследования Карпатской аномалии электропроводности // *Геофиз. журн.* – 1999. – **21**, № 4. – С. 59–70.
7. *Ладанівський Б. Т., Ляцук Д. Н.* Геоелектрична модель південно-західної околиці Східно-Європейської платформи вздовж профілю РП-5 Глибока – Кельменці // *Доп. НАН України.* – 2006. – № 5. – С. 99–104.
8. *Новоожинский К., Пушкарев П. Ю.* Анализ эффективности программ для двумерной инверсии магнитотеллурических данных // *Физика Земли.* – 2001. – **6**. – С. 72–85.
9. *Siripunvagaporn W., Egbert G.* An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data // *Geophysics.* – 2000. – **65**, No 3. – P. 791–803.
10. *Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Ладанівський Б. Т.* Геоэлектрическая 2D модель вдоль профиля Рахов – Борщев // *Доп. НАН України.* – 2006. – № 11. – С. 114–118.
11. *Semenov V. Yu., Pek J., Adama A., Ernst T., Jozwiak W., Kowachikova S., Ladanivskyy B., Logvinov I., Nowozynski K., Tarasov V., Vozar J.* Experimental Team of CEMES Preliminary analysis of long-period induction across the Trans-European suture zone: CEMES project (2001. – 2004) // *Reports of 17th Intern. Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth.* – 2004.
12. *Геологические карты западных областей Украины на срезях – 3000, – 5000, 7000 м /* Ред. В. В. Глушко. – Киев: Мингео УССР, 1979. – 10 с.
13. *Рокитянский И. И.* Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. – Киев: Наук. думка, 1975. – 279 с.

*Карпатское отделение Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины, Львов
Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 23.05.2007