

---

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.04.067>

УДК 550.837.211: 477.41:451.14

**И.М. Логвинов, И.В. Гордиенко, В.Н. Тарасов**

Институт геофизики НАН Украины им. С.И. Субботина, Киев

E-mail: [anna\\_log@ukr.net](mailto:anna_log@ukr.net)

## **Геоэлектрическая модель (по данным 2D инверсии результатов магнитотеллурических исследований) вдоль геотраверса ДОБРЕ-3**

*Представлено академиком НАН Украины В.И. Старостенко*

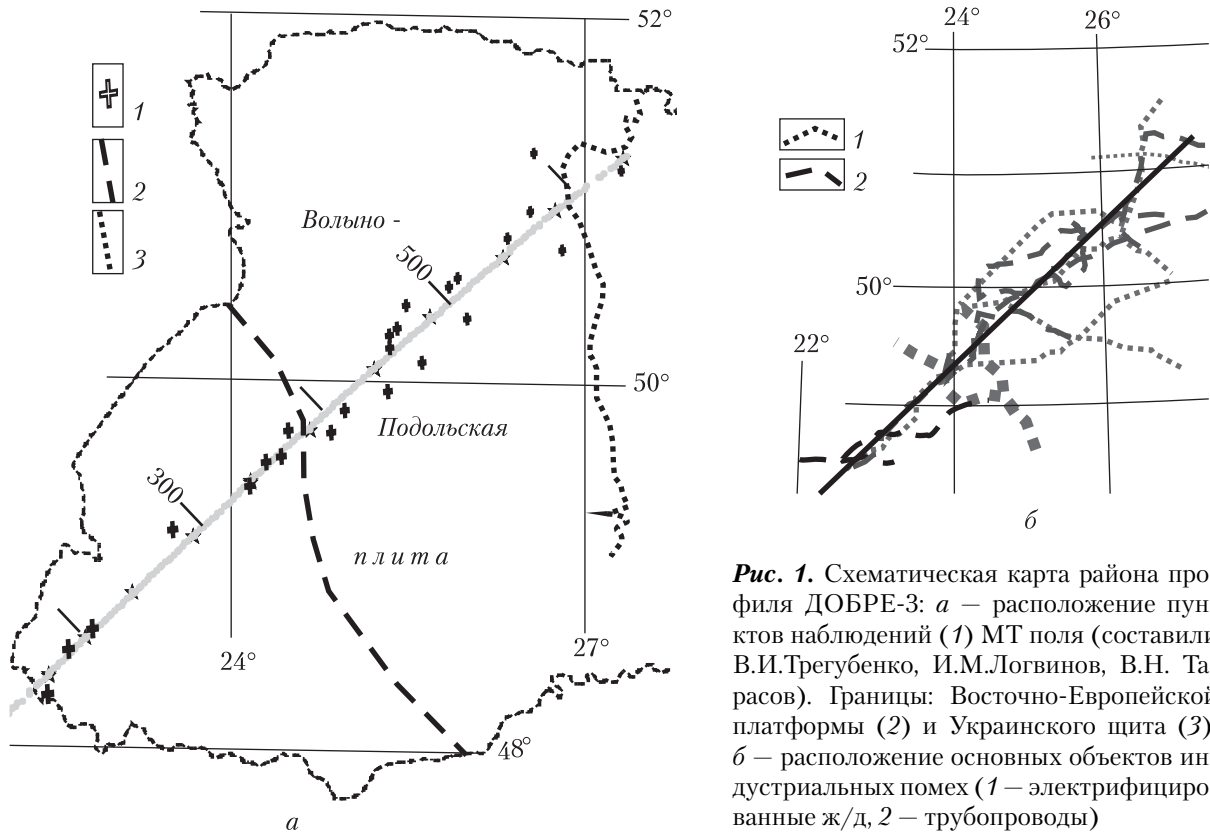
*На основании двумерной инверсии данных магнитотеллурических исследований в полосе сейсмического профиля ДОБРЕ-3 выявлено несколько объектов пониженных сопротивлений (ОПС). По результатам инверсии только магнитовариационных данных в верхах коры выделяется два участка ОПС, согласующихся с зонами пониженных скоростей. При использовании данных магнитовариационных и магнитотеллурических зондирований выделяется ОПС в верхней мантии на глубинах 50–90 км. Пространственно и по глубине этот ОПС согласуется с зоной частичного плавления, связанной с Тернопольской зоной активизации.*

**Ключевые слова:** *проводимость, геоэлектрические разрезы, земная кора, верхняя мантия, тектоническая активизация, Вольно-Подольская плита.*

Задачей работы было исследование геоэлектрического строения земной коры и верхней мантии вдоль международного сейсмического геотраверса ДОБРЕ-3, в зарубежных публикациях обозначаемый как PANCAKE [1] (рис.1). Для построения геоэлектрической модели использованы результаты, основанные на регистрации вариаций магнитотеллурического (МТ) поля. Авторами последние 10 лет проводились геоэлектрические исследования с помощью современной цифровой аппаратуры. В настоящей работе использованы данные, приведенные в [2, 3] и полученные в 2017 г. Кроме того, учитывались результаты предыдущих исследований производственных организаций [4–6]. Результаты производственных организаций позволили предварительно охарактеризовать структуру передаточных функций МТ поля в “разведочном” диапазоне периодов (от 1–10 до 1000 с).

В настоящем исследовании использованы данные в более широком диапазоне периодов (от 16 до 10000 с), что позволило на основании 2D инверсии получить геоэлектрическую модель до глубины порядка 70 км.

**Экспериментальные данные и методика интерпретации.** Построение геоэлектрических моделей проведено на основе интерпретационных параметров, в качестве которых приняты



**Рис. 1.** Схематическая карта района профиля ДОБРЕ-3: *а* – расположение пунктов наблюдений (1) МТ поля (составили В.И.Трегубенко, И.М.Логвинов, В.Н. Тарасов). Границы: Восточно-Европейской платформы (2) и Украинского щита (3); *б* – расположение основных объектов промышленных помех (1 – электрифицированные ж/д, 2 – трубопроводы)

импедансы, определяемые в методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и магнитовариационные переходные функции в методе магнитовариационного профилирования (МВП) в диапазоне периодов 10–10000 с. Также использованы интерпретационные параметры метода МТЗ (в виде кривых кажущегося сопротивления ( $\rho_r$ ) и фазы импеданса ( $\varphi_z$ )) и метода МВП (в виде вертикальных магнитных переходных функций (ВМПФ)).

В результатах, полученных авторами работы, интерпретационные параметры имеются для всего диапазона периодов. Результаты производственных организаций представлены в виде кривых МТЗ в диапазоне периодов от 1–10 до 1000–1600 с, а значения ВМПФ – в диапазоне периодов 50–1000 с. Методика представления интерпретационных параметров для целей 2D моделирования описана в [7].

Практически во всех реальных ситуациях наблюдения компонент МТ поля осложнены помехами, что часто приводит к сильным смещениям оценок тензора импеданса, которые не могут быть правильно проинтерпретированы. С точки зрения наличия промышленных помех профиль ДОБРЕ-3 расположен крайне неудачно для проведения в его полосе МТ наблюдений (см. рис. 1, б). Серьезные искажения МТ поля и его передаточных операторов, вызванных промышленными помехами, не позволили получить кондиционные данные на участке профиля, пересекающем Карпатский регион. Поэтому практически моделирование проведено для отрезка профиля, расположенного на территории Вольно-Подольской плиты (ВПп) и лишь частично захватывает территорию Предкарпатского прогиба.

Индукционные зондирования, к которым относятся методы с использованием вариации МТ поля, в диапазоне периодов больше 10 с имеют плохую разрешающую способность по отношению к породам с большими значениями  $\rho_k$ . Поэтому целью индукционных зондирований является поиск объектов пониженного сопротивления (ОПС), залегающих в толще пород, сопротивление которых в несколько раз превышает  $\rho_k$  ОПС.

Геоэлектрические параметры земных недр оценивали методом двумерной (2D) инверсии по программе REVOOC [8]. Для 80–90 % пунктов удалось получить данные для ТЕ, ТМ и ТР (включение последней существенно улучшило качество результатов моделирования) мод, причем обязательным условием отбора кривых МТЗ для инверсии было наличие фазы импеданса. Согласно простиранию профиля за продольные кривые МТЗ (ТЕ мода) приняты кривые квазиширотного, а за поперечное (ТМ мода) – квазимеридионального простирания. Результаты ВМПФ представлены в виде проекций индукционных стрелок  $S_u$  и  $S_v$  (ТР мода), спроектированных на линию профиля.

Для определения геоэлектрических параметров консолидированной земной коры и мантии необходимо как можно точнее учесть геоэлектрические параметры поверхностных отложений. С помощью карты суммарной продольной проводимости осадочных отложений ( $S_{oc}$ ) от Паннонской впадины до Припятского прогиба [7] были вычислены значения продольного сопротивления ( $\rho_1 = N_{oc} / S_{oc}$ , где  $N_{oc}$  – мощность поверхностных отложений). Значения  $N_{oc}$  [9] и  $\rho_1$  были закреплены в стартовых моделях. Геоэлектрические параметры консолидированной коры и мантии в стартовой модели взяты согласно 1D инверсии индукционной кривой на геомагнитной обсерватории Киев [10]. Шаг по горизонтали менялся от 3 до 6 км в зависимости от расстояния между пунктами наблюдений. Мощность слоев взята пропорционально длине волны используемого частотного диапазона и изменялась от 0,5 до 2 км для коры и от 4 до 15 км для верхней мантии. Используемый частотный диапазон и длина профиля моделирования позволяют обоснованно рассматривать геоэлектрический разрез до глубины 90 км. В то же время для кондиционного определения пара-

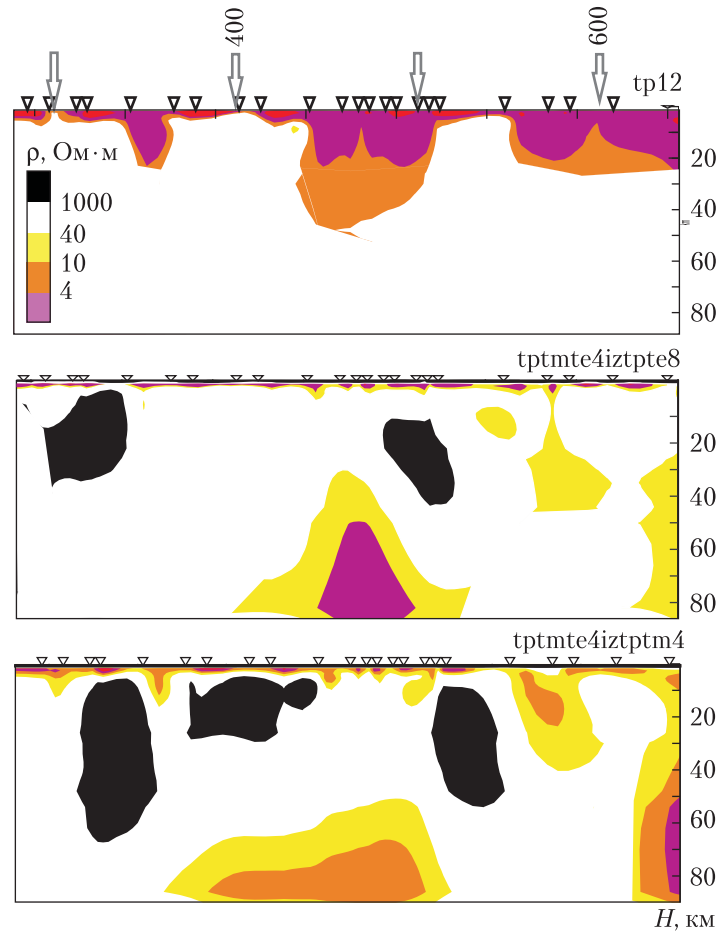
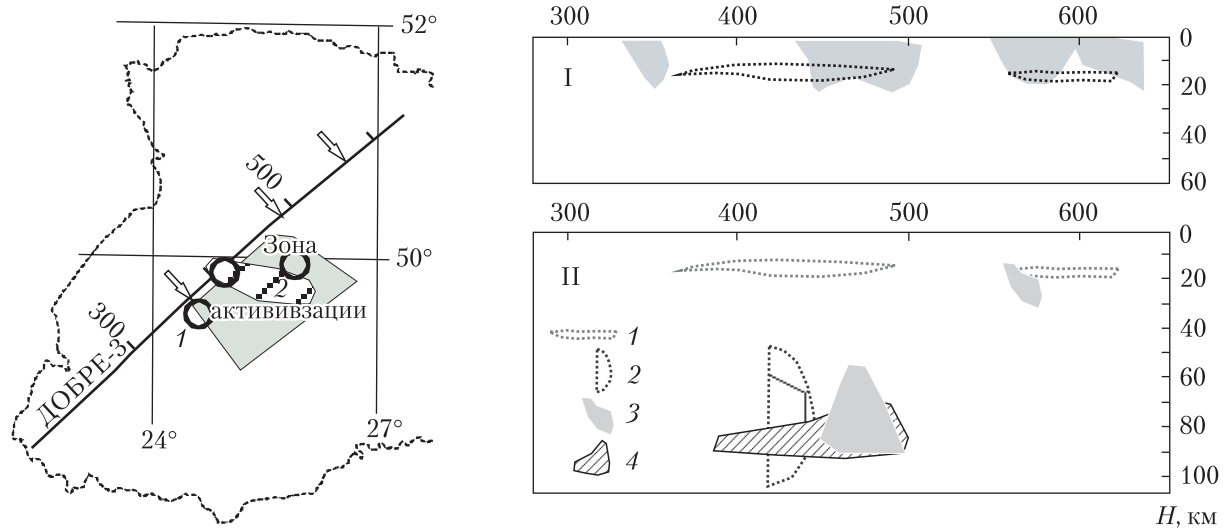


Рис. 2. Геоэлектрические модели с использованием разных наборов экспериментальных данных



**Рис. 3.** Расположение Тернопольской зоны современной активизации; нефтегазоносность: 1 – проявления углеводородов, 2 – зоны поднятия фундамента, перспективные для образования локальных структур с возможным расположением углеводородов; стрелками отмечены границы слоев пониженных скоростей

**Рис. 4.** Сопоставление слоев пониженной скорости (1), тепловой модели (2) и ОПС (3 – контур по изолинии  $\rho = 4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , 4 – контур по изолинии  $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). Геоэлектрические модели: I – по ТП моде, II – по ТЕ и ТМ модам

метров на глубинах, меньших 2–4 км, уровень значений  $\rho_1$  требует наличия интерпретационных параметров на периодах меньше 10 с. Поэтому геоэлектрические параметры до глубины 4 км и ниже 90 км при моделировании были закреплены.

Обычно приводится оценка точности значений кривых МТЗ в пределах 10 %. При проведении инверсии нами была принята погрешность индивидуальных значений, равная тройной погрешности: 30 % для  $\rho_k$  и 5–10<sup>0</sup> для фаз импедансов. Значения  $C_u$  и  $C_v$  определены с точностью 0,01–0,03, поэтому погрешность индивидуальных значений была взята равной 0,06.

В программе REBOCC трудно закрепить значение  $\rho$  проводящих объектов и она построена таким образом, что в результате моделирования подбираются объекты с минимальными пространственными размерами и минимальными  $\rho$ .

**Результаты 2D моделирования.** Методически моделирование проводилось в три этапа, детально описанных в [7]. На рис. 2 представлены модели, полученные с использованием разного сочетания ТЕ, ТМ и ТР мод. При использовании только ТР моды (см. рис. 2, модель tr12) для большинства пунктов удалось подобрать модели, в которых невязки не превышают 2,3, что свидетельствует о близости моделей к двумерным. При использовании любых других сочетаний мод невязки превышают 2,5 как для пунктов вдоль профиля, так для исследуемых периодов, что указывает на плохое соответствие данных МТЗ двумерной модели. Такой результат, вероятнее всего, связан с использованием при моделировании данных МТЗ (выполненных до 2000 г.), представленных только в направлении измерительных линий (ориентированных по меридиану и широте), в то время как линия профиля протягивается под азимутом, близким к 40° на восток. Отметим, что региональные разломные

зоны разного возраста в основном на ВПП имеют квазиширотное простирание. Магнито-вариационные данные спроектированы на линию профиля.

При моделировании на всех моделях при использовании трех мод в интервале ПК450–500 (профиля ДОБРЕ-3) проявляется объект пониженного сопротивления (см. рис. 2). Кровля наиболее проводящей части объекта располагается приблизительно на 50 км, а центр – на 70 км. По магнитовариационным данным наиболее проводящая часть ОПС, в указанном интервале пикетов, располагается в интервале глубин от поверхности Земли до 20 км. Еще один ОПС выделяется на разных моделях в интервале ПК550–600. Центр наиболее проводящей части объекта близок к 10 км.

При использовании данных МТЗ (основанных как на ТЕ, так и ТМ мод) на разрезах вдоль профиля выделяются интервалы с высокоомными объектами ( $\rho$  больше 1000 Ом · м): ПК300–350 км и ПК400–430 км. Кровля объектов на всех моделях располагается на глубине менее 10 км, центр – в интервале глубин 20–30 км. По разным моделям объемы объектов различаются за счет большего размера по глубине. Большие объемы отмечаются при использовании в первую очередь моделирования по ТМ моде.

**Обсуждение.** В работе [3] на основании комплексной интерпретации геофизических данных выделена современная зона активизации, начало которой относится к периоду 5 млн лет назад (рис. 3). Согласно тепловой модели в верхней мантии на глубинах 50–100 км существует область частичного плавления. На сейсмическом разрезе вдоль профиля ДОБРЕ-3 [1] на исследованном участке в земной коре выделены два низкоскоростных слоя: в интервале ПК380–480, начало второго на ПК535 (северо-восточное окончание уходит за пределы профиля).

Сопоставление геоэлектрических моделей с этими данными приведено на рис. 4. Наиболее низкоомные части ОПС по данным ТР моды согласуются с низкоскоростными зонами. Выделяемый в нижней мантии ОПС, полученный при использовании всех трех мод, по глубине и пространственно хорошо согласуется с предполагаемой (по тепловой модели) зоной частичного плавления. Привлечение к интерпретации ТЕ и ТМ мод изменило геоэлектрическую модель земной коры (отсутствуют ОПС, связанные с низкоскоростными зонами).

Высокоомный объект в районе ПК500 может быть связан с выходом на поверхность Земли докембрийских пород несколько юго-восточнее профиля с осью по линии Гоща–Острог. Высокоомный объект располагается на контакте Восточно-Европейской платформы и Предкарпатского прогиба.

Таким образом, параметры процессов современной активизации известны с большими допусками, поэтому построение их моделей может быть осуществлено только в виде вариантов. Проведенная интерпретация геоэлектрических данных позволила, несмотря на указанные недостатки, не только определить основные черты распределения геоэлектрических параметров, но и создать базу для учета этих параметров при анализе других данных глубинной геофизики.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Starostenko V., Janik T., Kolomiyets K., Czuba W., Sroda P., Grad M., Kovacs I., Stephenson R., Lysynchuk D., Thybo H., Artemieva I.M., Omelchenko V., Gintov O., Kutas R., Gryn D., Guterch A., Hegedus E., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. Seismic velocity model of the crust and upper mantle

- along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*. 2013. **608**. P. 1049–1072.
2. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Усенко О.В. Украинские Карпаты (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2011. 128 с.
  3. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Пек Й., Тарасов В.Н., Усенко О.В. Волыно-Подольская плита (геофизика, глубинные процессы). Киев: Наук. думка, 2012. 193 с.
  4. Железняк Л.С., Трегубенко В.И. Результаты комплексных геофизических работ в северо-западной части Волыно-Подольской плиты. Киев: Фонды ГПП “Севукргеология”, 1989. 54 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. Трегубенко В.И., Финчук Л.Л., Белошاپская Н.В. Результаты региональных работ методом МТЗ в северо-западной части УССР. Киев: УТГФ, 1989. 130 с.
  7. Logvinov I.M. Deep geoelectrical structure of the Central and Western Ukraine. *Acta Geophys.* 2015. **63**, № 5. P. 1216–1230. doi: <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0049>.
  8. Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*. 2000. **65**, № 3. P. 791–803.
  9. Атлас. Глибинна будова літосфери та екогеологія України: Байсарович М.М., Митропольський О.Ю., Чуприна І.С. (ред.). Київ: ІГН НАН України, 2002. 55 с.
  10. Semenov V.Yu., Pek J., Adam A., Jozwiak W., Ladanyvskyy B., Logvinov I., Pushkarev P., Vozar J. Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project. *Acta Geophys.* 2008. **56**, № 4. P. 957–981.

Поступило в редакцию 02.10.2017

## REFERENCES

1. Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Sroda, P., Grad, M., Kovacs, I., Stephenson, R., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I.M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedus, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T. & Tolkunov, A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, pp. 1049-1072.
2. Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V., Kovachikova, S., Logvinov, I. M., Tarasov, V. N. & Usenko, O. V. (2011). Ukrainian Carpathians (Geophysics, deep processes). Kiev: Lohos (in Russian).
3. Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V., Kovachikova, S., Logvinov, I. M., Pec, J., Tarasov, V. N. & Usenko, O. V. (2012). Volyn-podolskaya plate (Geophysics, deep processes). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
4. Zheleznyak, L. S. & Tregubenko, V. I. (1989). The results of complex geophysical work in the northwestern part of the Volyn-Podolskaya plate. Kiev: The funds of the GGP “Sevukrheolohiya” (in Russian).
5. Tregubenko, V. I., Meged, G. V., Gornyak, Z. V. & Vasilenko, V. A. (1994). The results of the area survey of MTZ scale 1 : 2500000 in the western part of Ukraine. Kiev: Heoinform (in Russian).
6. Tregubenko, V. I., Finchuk, L. L. & Beloshapskaia, N. V. (1989). The results of regional works by the method MTZ of the north-western part of USSR. Kiev: UTHF (in Russian).
7. Logvinov, I. M. (2015). Deep geoelectrical structure of the Central and Western Ukraine. *Acta Geophysica*, 63, No. 5, pp. 1216-1230. doi: <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0049>
8. Siripunvaraporn, W. & Egbert, G. (2000). An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, 65, No. 3, pp. 791-803.
9. Baysarovich, M. M., Mitropolsky, O. Yu. & Chuprina, I. S. (Eds.). (2002). Atlas. The deep structure of the lithosphere and eco-geology of Ukraine. Kiev: IGPh NAS of Ukraine (in Ukrainian).
10. Semenov, V. Yu., Pek, J., Adam, A., Jozwiak, W., Ladanyvskyy, B., Logvinov, I., Pushkarev, P. & Vozar, J. (2008). Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project. *Acta Geophysica*, 56, No. 4, pp. 957-981.

Received 02.10.2017

*I.M. Logvinov, I.V. Gordienko, V.M. Tarasov*

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

E-mail: anna\_log@ukr.net

ГЕОЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛЬ (ЗА ДАНИМИ 2D ІНВЕРСІЇ  
РЕЗУЛЬТАТІВ МАГНІТОТЕЛУРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ)  
УЗДОВЖ ГЕОТРАВЕРСА ДОБРЕ-3

На підставі двовимірної інверсії даних магнитотелуричних досліджень у смузі сейсмічного профілю ДОБРЕ-3 виявлено декілька об'єктів зі зниженим опором (ОЗО). За результатами інверсії тільки магнітоваріаційних даних у верхніх шарах кори виділяється дві ділянки ОЗО, що узгоджуються із зонами знижених швидкостей. З використанням даних магнітоваріаційних і магнитотелуричних зондувань виділено ОЗО у верхній мантії на глибинах 50–90 км. Просторово і за глибиною цей ОЗО узгоджується із зоною часткового плавлення, пов'язаною з Тернопільською зоною активізації.

**Ключові слова:** *провідність, геоелектричні розрізи, земна кора, верхня мантія, тектонічна активізація, Волино-Подільська плита.*

*I.M. Logvinov, I.V. Gordienko, V.N. Tarasov*

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: anna\_log@ukr.net

THE GEOELECTRIC MODEL (BASED ON THE 2D INVERSION  
OF THE RESULTS OF MAGNETOTELLURIC STUDIES)  
ALONG THE DOBRE-3 GEOTRAVERSE

Based on the two-dimensional inversion of magnetotelluric data, several objects with reduced resistance are located in the band of the DOBRE-3 seismic profile. According to the inversion of only the magnetovariation data, two regions with reduced resistance are located in the upper layers of the crust; they agree with the zones of reduced velocities. By the data of variations of the geomagnetic field and magnetotelluric soundings, the object with reduced resistance in the upper mantle is located at depths of 50-90 km. Spatially and in depth, this object is consistent with the zone of partial melting associated with the Ternopil activation zone.

**Keywords:** *conductivity, geoelectric section, crust, upper mantle, tectonic activation, Volyn-Podolian plate.*