

Опыт изображения пространственной геоэлектрической модели по результатам двумерной инверсии параметров магнитотеллурического поля на примере Ингульского мегаблока

© И. М. Логвинов, В. Н. Тарасов, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 24 октября 2012 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

На підставі декількох десятків кривих МТЗ із залученням магнітоваріаційних параметрів уперше виконано 2D інверсію по 8 взаємно перпендикулярних профілях, які покривають площу від 30° до 32° сх.д. і від 47,8° до 49,5° півн.ш. За результатами моделювання побудовано тривимірну геоелектричну модель регіону з використанням програмного комплексу, розробленого авторами. Відповідно до моделі, надра регіону, вивчені до глибини близько 60 км, рясніють неоднорідностями провідності. Покрівля найбільш упевнено виділених об'єктів розміщується на глибині понад 6 км. Найбільш провідні частини об'єктів (з опором менше 10 Ом·м та інтегральною провідністю складової понад 50 % від загальної величини) розміщуються в інтервалі глибин 20—40 км. Найбільш провідні частини аномальних об'єктів узгоджуються зі Смілянською та Бобринецькою зонами розломів і з перетином ними Голованівської шовної зони.

Based on dozens of MTS curves involving magnetic variation of parameters 2D inversion of 8 mutually perpendicular profiles covering the area from 30 to 320 °E and from 47,8 to 49,50 °N was first performed. The obtained results of the simulation were used to construct a three-dimensional model of the geoelectric region using a complex software developed by the authors. The model indicates that the subsoil of the region studied to a depth of 60 km, has got numerous conductivity heterogeneities. The depth of the roof, of the most reliably selected objects, occurs below 6 km. The most conductive parts of objects (with a resistance of less than 10 ohm m and the integral conductivity of more than 50 % of the total) are located at the depths of 20—40 km. The most conductive parts of anomalous objects are consistent with Smelyansk and Bobrinets fracture zones and with their cross-section with Golovanev suture zone.

Введение. Ингульский мегаблок расположен в центральной части Украинского щита (УЩ) между Тальновской и Криворожско-Кременчугской зонами разломов и включает в себя Кировоградский рудный район, Голованевскую на западе и Ингулеcko-Криворожскую на востоке шовные зоны (рис. 1). Последняя, называемая также Ингулеcko-Криворожско-Крупецкой [Геология..., 1992; Галецкий, Шевченко, 2006], протягивается на сотни километров от Черного моря практически до Московской синеклизы.

В 1967 г. в результате магнитовариационных исследований на УЩ, проведенных сотрудниками Института геофизики НАН Украины (ИГФ) под руководством И. И. Рокитянского, была выявлена одна из крупнейших в Европе Кировоградская аномалия электропроводности (КирАЭ) [Рокитянский и др., 1969]. Даль-

нейшие многолетние геоэлектрические исследования показали сложное строение объекта, объясняющее поведение магнитотеллурического (МТ) поля в районе аномалии [Рокитянский, 1975; Бурьянов и др., 1985; Дьяконова и др., 1986; Бурахович, Кулик, 1999; Логвинов, Тарасов, 2005; Гордиенко и др., 2005; Геолого-геофизическая..., 2006; Логвинов, 2012]. Результаты двумерной и трехмерной инверсий данных МТЗ и МВП последних лет подтвердили приуроченность основного объекта КирАЭ к Ингулеcko-Криворожско-Крупецкой шовной зоне.

На протяжении 80—90-х годов прошлого века на территории западнее Ингулеcko-Криворожско-Крупецкой шовной зоны (ИККШЗ) были выполнены многочисленные наблюдения МТ поля производственными организациями бывшего Мингео УССР под руководством в

основном А. И. Ингерова и В. И. Трегубенко [Ингерова, 1989; Трегубенко и др., 1989, 1994 и др.].

В отделе тектоносферы ИГФ НАНУ в 2000—2007 гг. была выполнена переобработка аналоговых записей прежних лет и проведены экспериментальные исследования с помощью современной цифровой магнитотеллурической аппаратуры в нескольких десятках пунктов, расположенных западнее 32° в.д.

В Голованевской шовной зоне сотрудниками УкрНИМИ были выполнены магнитотеллурические исследования с помощью современной цифровой аппаратуры [Геолого-геофизическая..., 2008]. К сожалению, интерпретационные параметры МТ поля в этой работе не приведены, поэтому они не могут быть использованы в настоящей статье.

На основе перечисленных данных была впервые построена геоэлектрическая модель вдоль профиля ГСЗ XXIV Канев—Николаев [Логвинов и др., 2008]. Эта модель позволила изучить геоэлектрические особенности Смелянской и Субботско-Мошоринской зон разломов. Оказалось, что на территории Ингульского мегаблока кроме КирАЭ присутствуют и другие объекты пониженного сопротивления (ОПС).

В настоящее время практически ни одна геолого-геофизическая задача не решается без использования той или иной геоинформационной технологии. Существенный прогресс в развитии программного обеспечения связан с внедрением географических информационных систем. Последние работают с координатно-привязанными объектам и позволяют реализовывать топологическое покрытие при построении различного типа карт. Топологическое покрытие — это наложение друг на друга нескольких различных по тематике картографических объектов — пунктов наблюдений и значений физического параметра в них, изолиний разных геолого-геофизических параметров и др.

Экспериментальные данные. Для интерпретации использовались данные глубинного МТЗ и магнитовариационные параметры (в диапазоне периодов от 9—16 до 6400 с), полученные в отделе тектоносферы ИГФ, а также кривые региональных МТЗ, полученные производственными организациями бывшего Мингео УССР [Ингерова, 1989; Трегубенко и др., 1989, 1994]. Основная часть амплитудных и фазовых кривых региональных МТЗ получена в диапазоне периодов от 4—16 до 900—1600 с.

Только в работах [Трегубенко и др., 1989, 1994] опубликованы магнитовариационные параметры для периодов 100 и 1000 с.

Поскольку для инверсии использовались обе компоненты кривых МТЗ (амплитуда и фаза), то на каждом профиле минимальный период выбирался таким образом, чтобы данные были не менее чем на половине пунктов. Аналогичным образом выбирался максимальный период. На всех меридиональных профилях диапазон периодов оказался одинаковым от 16 до 2500 с, на широтных профилях начальный диапазон изменялся от 4 до 36 с, а конечный — от 1600 до 4900 с.

Длина профилей также изменялась в зависимости от имеющихся данных. Часть широтных профилей начиналась от 29° в.д. и протягивалась до 35° в.д. Меридиональные профили частично начинались севернее 50° с.ш., но все они пересекали самый южный широтный профиль. На каждом профиле в пределах выбранной для дальнейших построений площади имелось от 11 до 18 пунктов наблюдений. Расстояния между пунктами изменялось от первых километров до 30 км.

Выбранный частотный диапазон данных и длина профилей позволили получить достаточно четкое представление о геоэлектрических параметрах недр в интервале глубин от 1 до 60 км.

Двумерная инверсия. Явно трехмерная конфигурация гранитоидных массивов, наличие взаимоперпендикулярных разломных зон, расположение на восточной границе площади КирАЭ определяют сложности построения геоэлектрических моделей. Не зная простирающие объектов пониженного сопротивления, нельзя правильно ориентировать интерпретационные профили для двумерной инверсии. С учетом этого была выполнена формализованная процедура построения трехмерной геоэлектрической модели, основанная на результатах 2D инверсии вдоль профилей, ориентированных по широте и долготе. Поскольку профили ориентированы строго по сторонам света, их аббревиатура соответствует географическому направлению.

Моделирование выполнено по программе двумерной инверсии REBOCC [Siripunvaraporn, Egbert, 2000]. Идеология программы REBOCC базируется на эффективном варианте инверсии OCCAM. Суть инверсии OCCAM заключается в поиске максимально гладкой (минимально структурированной) модели, которая удовлетворяет экспериментальным данным и точности их определения.



Рис. 1. Схема расположения профилей двумерного моделирования на тектонической карте, по [Гинтов, Мычак, 2012] с упрощениями: 1 — профили, 2, 3 — шовные зоны (2 — Ингулецко-Криворожская, 3 — Голованевская), 4 — массивы гранитоидов (I — Корсунь-Новомиргородский плутон, II — Новоукраинский массив), 5 — межрегиональный тектонический шов Херсон—Смоленск, 6 — зоны разломов (1 — Тальновская, 2 — Первомайская, 3 — Кировоградская), 7 — контур объекта КирАЭ, по [Логвинов, 2012].

Методика интерпретации. Размер ячеек по горизонтали и вертикали и геоэлектрические характеристики вмещающей среды для всех профилей были одинаковыми, что обеспечило корректность построения объемной модели. Отличием методики моделирования было использование априорной информации, которая заключалась в следующем.

1. На всех меридиональных профилях задавались параметры осадков Днепровско-Донецкой впадины и Южно-Украинской моноклинали, соответствующие величинам суммарной продольной проводимости, согласно работам [Гордиенко и др., 2005; Логвинов, 2012].

2. На всех широтных профилях задавались геоэлектрические параметры КирАЭ, по дан-

ным [Логвинов, Тарасов 2005; Гордиенко и др., 2005; Логвинов, 2012].

3. Геоэлектрические параметры верхней мантии в «нормальном» разрезе взяты согласно одномерной инверсии обобщенной кривой зондирования обсерватории «Киев» [Semenov et al., 2008].

По длине интерпретационных профилей и частотному диапазону использованных данных достоверные данные о геоэлектрическом разрезе могут быть получены до максимальной глубины 60 км. Поэтому параметры на больших глубинах были закреплены, и на их фоне искалось распределение геоэлектрических характеристик в верхней 60-километровой толще. Важным моментом методики интерпретации

было использование ключей программы инверсии, которые позволяли учитывать реальное наличие экспериментальных данных для каждого параметра в каждом пункте и на каждом периоде, что способствовало определению наиболее достоверных проводящих объектов.

Учет гальванических искажений кривых МТЗ проводился путем одномерной инверсии (по программам D+ алгоритм [Parker, Whaler, 1981] и OCCAM [Constable et al., 1987]) обобщенных кривых зондирования. Обобщенные кривые зондирования были построены путем сочленения кривых МТЗ в каждом пункте с опорной кривой магнитовариационного зондирования в геомагнитной обсерватории «Киев» [Semenov et al., 2008].

При моделировании по программе REBOOC выдаются среднеквадратические невязки (rms) модельных и экспериментальных значений: общая для всего используемого объема данных, по каждому интерпретационному параметру, по всем периодам и пунктам. Выбор окончательной модели проводился с учетом всех указанных невязок. На большинстве профилей величины rms изменялись в пределах 2—3, что считается удовлетворительной оценкой.

Трехмерная геоэлектрическая модель. В рамках автоматизированной геоинформационной системы ГИС ТАРИГ для построения объемной модели был создан программный комплекс (D3M) с использованием среды MATLAB. Комплекс позволяет оперативно создавать трехмерную матрицу, которая включает результаты по профилям или по площади. Используя полученную матрицу, на следующем этапе строятся объемные модели. В настоящей работе для построения трехмерной матрицы были взяты результаты 2D инверсии в виде таблиц значений удельного электрического сопротивления (ρ) на каждом профиле.

Геометрические параметры ячеек в горизонтальной плоскости трехмерной модели для данного примера были взяты равными 6 км, что является минимально возможным размером, учитывая неравномерный шаг между пунктами наблюдений на профилях и расстояния между профилями. Вертикальные размеры ячеек были взяты согласно шагу по вертикали двумерных моделей. В программе D3M предусмотрен любой шаг. Построение 3D модели с равными шагами выполняется достаточно быстро.

Представление трехмерной модели возможно различными способами. Комплекс позволяет представлять объемную модель выбранного параметра в различных вариантах: в виде блоков,

контур-срезов, изоповерхностей и т. д. Остановимся на трех основных изображениях. Наиболее простой и распространенный способ заключается в построении распределения параметров на различных срезах по глубине (рис. 2).

На рис. 3 показано распределение ОПС в виде блоков. Для получения полного представления о распределении ОПС в исследуемом объеме недр Земли приходится делать рисунки с различных углов зрения. Для наглядности на каждом рисунке указано географическое расположение стран света.

Наиболее сложное зрительное восприятие имеет представление ОПС в виде изоповерхностей сопротивления (рис. 4), хотя оно наиболее наглядно показывает распределение ОПС в изучаемом объеме недр. Для более четкого представления геометрических параметров предлагается указывать географические координаты и глубину (маркеры) характерных точек каждого объекта.

Обсуждение результатов. Как следует из приведенных рисунков, распространение ОПС исследованного региона до глубины 50 км носит локальный характер. Наиболее достоверными ОПС были приняты объекты, окруженные изоповерхностью с $\rho < 40$ Ом·м. Кроме того, геометрические размеры ОПС должны были быть не менее двух ячеек.

Указанным требованиям удовлетворяют два объекта. Один расположен в южной, другой — в северной части региона. Верхняя кромка обоих объектов близка к глубине 8 км, близка по форме и их площадь. Наиболее проводящая часть ($\rho < 10$ Ом·м) северного объекта располагается в интервале глубин 30—40 км; верхняя кромка наиболее проводящей части ($\rho < 10$ Ом·м) южного объекта — на глубине около 20 км (и распространяется по меньшей мере до глубины 50 км).

Наиболее устойчивой характеристикой ОПС может служить параметр G , определяющий интегральную проводимость объекта [Рокитянский, 1975], $G = \Sigma h \cdot L / \rho$, где h — мощность блока пород постоянного сопротивления, м; L — его ширина, м; ρ — сопротивление блока пород, Ом·м. Наиболее мощным по интегральной проводимости является южный объект.

Из представленных на рис. 2 и 4 контуров ОПС видно, что объекты в основном имеют квазиширотное простирание. Их вытянутость по широте как минимум в два раза превышает поперечные размеры. Такая форма ОПС согласуется с протяженными разломными зонами. Исходя из этого, интересно сравнить ОПС с

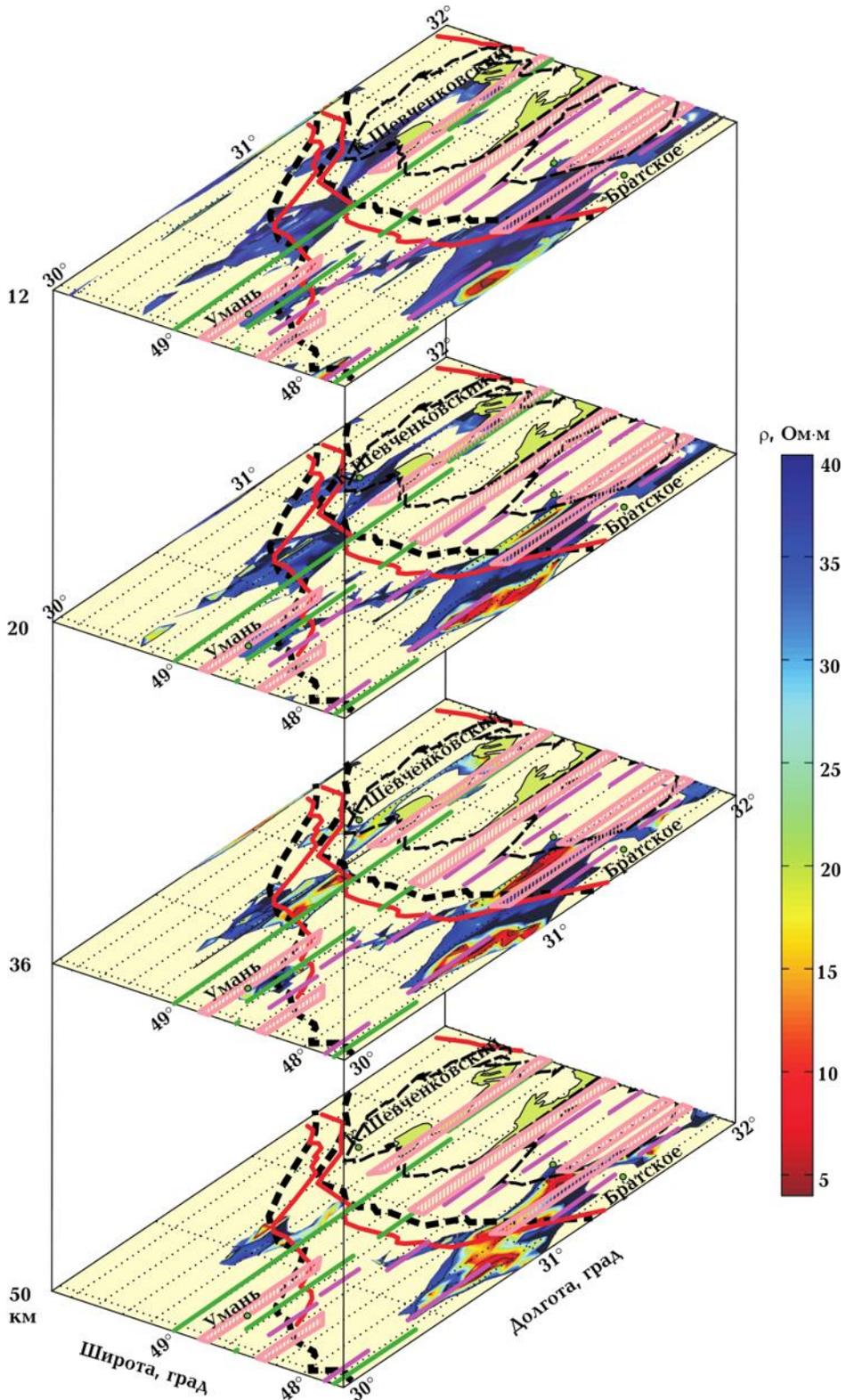


Рис. 2. Контуры ОПС с $\rho < 40$ Ом·м на различных глубинах.

сеткой разломных зон, выделенных различными геолого-геофизическими методами.

На рис. 5 показаны зоны разломов, выде-

ленные на основании геофизических методов [Гинтов, 2005; Гинтов, Мычак, 2012] и геологических данных в плиоцен-четвертичное время

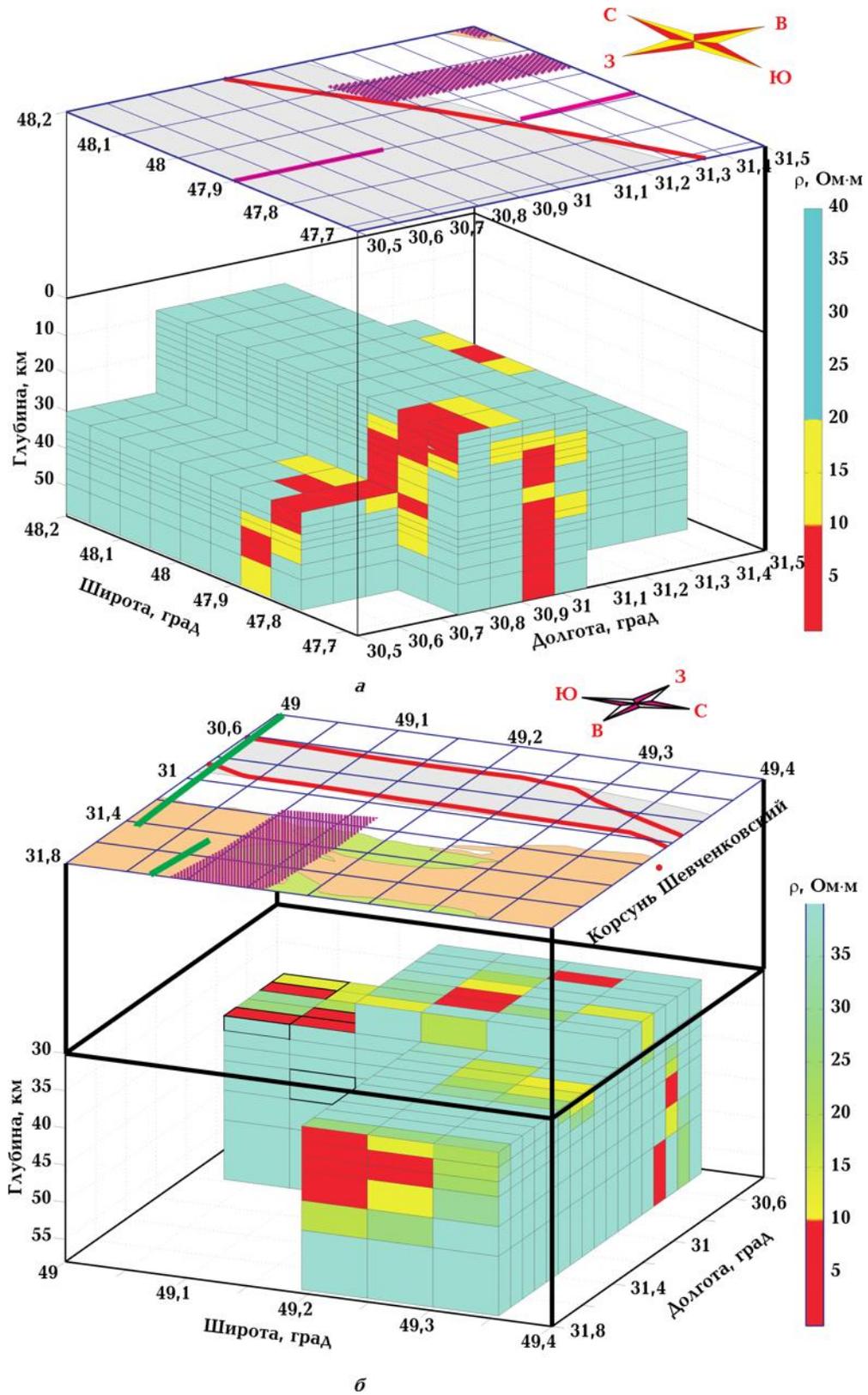


Рис. 3. Контуры ОПС с $\rho < 40$ Ом·м для района Бобринецкой (а) и Смелянской (б) зон разломов.

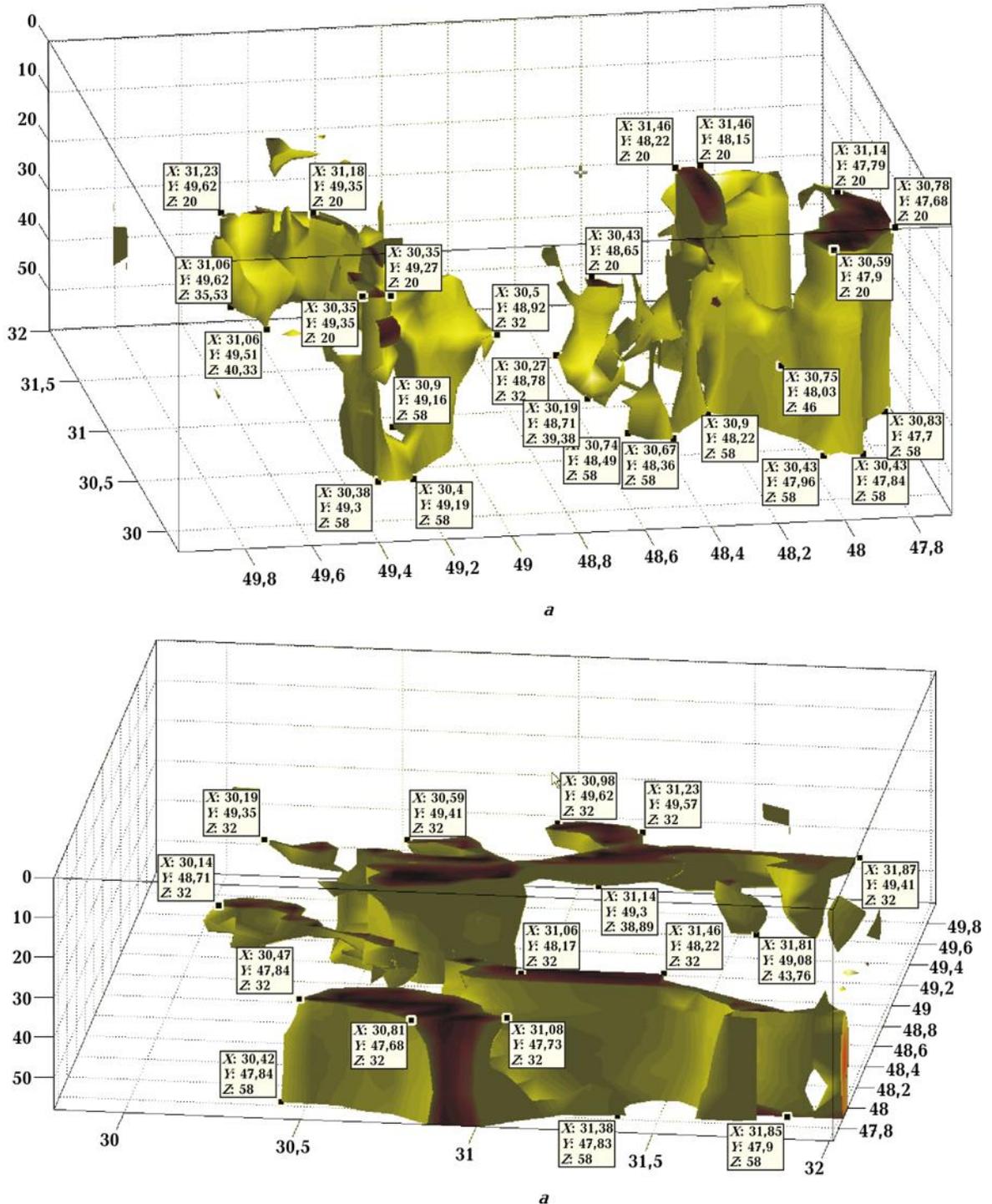


Рис. 4. Представление ОПС для региона исследований в виде изоповерхностей с $\rho < 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho < 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Кривая плоскости среза 20 км (а) и 32 км (б).

[Національний..., 2007] и новейшее время [Верховцев, 2006]. Активизация должна сопровождаться изменением физических параметров в

подобных зонах по сравнению с окружающей средой. Расхождение положения разломных зон в пространстве может свидетельствовать

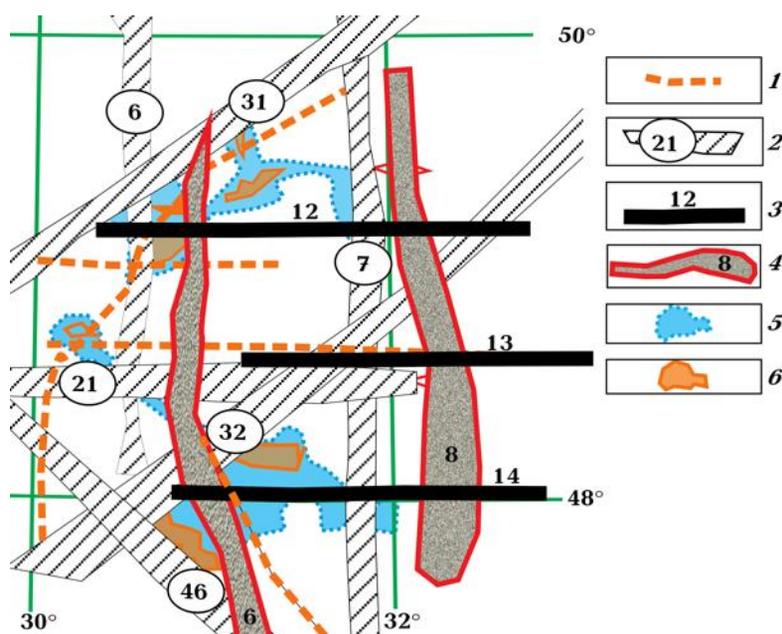


Рис. 5. Сопоставление ОПС с разломной тектоникой в пределах изучаемой территории: 1 — разломные зоны (1 — по [Національний..., 2007]; 2 — по [Верховцев, 2006] (6 — Чернобыльско-Врадиевская, 7 — Щорско-Николаевская, 21 — Мукачевско-Днепропетровская, 31 — Криворожско-Порожбинская, 32 — Врадиевско-Сумская, 46 — Камень-Каширско-Ялтинская); 3 — по геофизическим данным [Гинтов, 2005] (12 — Смелянская, 13 — Субботско-Мошоринская, 14 — Бобринецкая); 4 — по тектонофизическим данным [Гинтов, Мычак, 2012] (6 — Первомайская, 8 — Кироваградская); 5, 6 — контуры ОПС на глубине 32 км по изолиниям $\rho=40$ Ом·м (5) и 10 Ом·м (6).

о картографических ошибках, так как только в работе [Гинтов, Мычак, 2012] имеется точная привязка с применением ГИС технологий.

Указанные разломные зоны сопоставлены с проекцией контуров ОПС, расположенных на глубине 32 км, соответствующей центру максимальной интегральной проводимости объектов. Наиболее четко прослеживается приуроченность ОПС к широтным зонам разломов (на севере района к Смелянской, на юге к Бобринецкой зоне). Наиболее проводящие части ОПС, оконтуриваемые изолинией $\rho=10$ Ом·м, проявляются в зонах пересечения указанных разломов с Голованевской шовной зоной.

Авторы отдают себе отчет в том, что полученная геоэлектрическая модель не является окончательной. Остались не до конца разработаны многие вопросы методики применения двумерных моделей для интерпретации МТ данных в таком сложном по тектонике районе. Модель, конечно, будет уточняться с появлением новых экспериментальных данных, особенно выполненных в диапазоне аудиоманнитотеллурики.

Выводы. На основании нескольких десятков кривых МТЗ с привлечением магнитовариационных параметров впервые была выполнена 2D инверсия по восьми взаимно перпендикулярным профилям, покрывающим площадь от 30 до 32° в.д. и от 47,8 до 49,5° с.ш.

Полученные результаты моделирования были использованы для построения трехмерной геоэлектрической модели региона с применением программного комплекса, разработанного авторами. Модель указывает на то, что недра региона, изученные до глубины порядка 60 км, изобилуют неоднородностями проводимости. Глубина кровли наиболее уверенно выделенных объектов — ниже 6 км. Наиболее проводящие части объектов (с сопротивлением менее 10 Ом·м и интегральной проводимостью, составляющей более 50 % от общей величины) располагаются в интервале глубин 20—40 км.

Наиболее проводящие части аномальных объектов согласуются со Смелянской и Бобринецкой зонами разломов и с пересечением ими Голованевской шовной зоны.

Список литературы

Бурахович Т. К., Кулик С. Н. Квазитрехмерная геоэлектрическая модель Кироваградской аномалии

электропроводности // Геофиз. журн. — 1999. — 21, № 2. — С. 120—125.

- Бурьянов В. Б., Гордиенко В. В., Завгородняя О. В., Кулик С. Н., Логвинов И. М. Геофизическая модель тектоносферы Украины. — Киев: Наук. думка, 1985. — 212 с.
- Верховцев В. Новітні вертикальні рухи земної кори території України, їх взаємовідношення з лінійними та кільцевими структурами // Енергетика Землі, її геолого-екологічні прояви, науково-практичне використання. — Київ: Вид-во КНУ, — 2006. — С. 129—137.
- Галецький Л. С., Шевченко Т. П. Нові уявлення про структуру та рудоносність земної кори території України // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 5. — С. 57—65.
- Геология и металлогения юго-западной части Восточно-Европейской платформы (Украинский щит, Воронежский и Белорусский массивы). — 1:1 000 000. — Киев: Геопрогноз, 1992.
- Геолого-геофизическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита / Под ред. А. В. Анцифорова. — Донецк: Вебер, 2008. — 308 с.
- Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита / Под ред. А. В. Анцифорова. — Киев: Наук. думка, 2006. — 196 с.
- Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. — Киев: Феникс, 2005. — 572 с.
- Гинтов О. Б., Мычак С. В. Взбросы и надвиги в земной коре Кировоградского рудного района и связь с ними уранового оруденения // Геофиз. журн. — 2012. — **34**, № 3. — С. 84—91.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Корвін пресс, 2005. — 210 с.
- Дьяконова А. Г., Ингеро А. И., Рокитянский И. И. Электромагнитные зондирования на Восточно-Европейской платформе и Урале. — Киев: Наук. думка, 1986. — 140 с.
- Ингеро А. И. Результаты изучения кристаллического фундамента Украинского щита электромагнитными зондированиями: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Днепропетровск, 1989. — 16 с.
- Логвинов И. М. Геоэлектрические характеристики земной коры и мантии юго-запада Восточно-Европейской платформы и Карпат: Дис. ... д-ра геол. наук. — Киев, 2012. — 308 с.
- Логвинов И. М. Результаты одномерной инверсии глубинных магнитотеллурических зондирований на территории Западной Украины // Геодинаміка. — 2011. — № 2 (11). — С. 167—169.
- Логвинов И. М., Гордиенко В. В. Глубинное магнитотеллурическое зондирование на территории Каневского природного заповедника // Запов. справа в Україні. — 2005. — **11**, вип. 2. — С. 46—49.
- Логвинов И. М., Тарасов В. Н. Геоэлектрическая 2D модель Кировоградской аномалии электропроводности // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 5. — С. 754—769.
- Логвинов И. М., Гордиенко В. В., Гордиенко И. В. Исследование Смелянской и Субботско-Машоринской зон разломов вдоль сейсмического профиля Канев-Николаев // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 3. — С. 56—65.
- Національний атлас України / Гол. ред. Б. Є. Патон. — Київ: Держ. наук.-вироб. підприємство «Картографія», 2007. — 440 с.
- Рокитянский И. И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. — Киев: Наук. думка, 1975. — 279 с.
- Рокитянский И. И., Логвинов И. М., Лугинина Н. А. Магнитовариационное профилирование на Украинском щите // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1969. — № 3. — С. 100—111.
- Трегубенко В. И., Мерець 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.
- Трегубенко В. И., Финчук Л. Л., Белошанская Н. В. Результаты региональных работ методом МТЗ северо-западной части УССР. — Киев: УТГФ, 1989. — 130 с.
- Constable S. C., Parker R. L., Constable C. G. Occam's inversion: a practical algorithm for the inversion of electromagnetic data // Geophysics. — 1987. — **52**. — P. 289—300.
- Parker R. L., Whaler K. A. Numerical method for establishing solution to the inverse problem of electromagnetic induction // J. Geophys. Res. — 1981. — **86**. — P. 9574—9584.
- Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data // Geophysics. — 2000. — **65**, № 3. — P. 791—803.
- 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.