

## Геоэлектрические параметры земной коры западной части Украинского щита по данным одномерной инверсии магнитотеллурических зондирований

© *И. М. Логвинов, 2010*

Институт геофизики НАН Украины, Киев Украина

Поступила 2 апреля 2009 г.

*Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым*

На основі одновимірної інверсії кривих МТЗ на більшій частині Волинського і західній частині Подільського мегаблоків у "гранітному" шарі виділено об'єкти зниженого опору (ОЗО), які на сучасному етапі досліджень важко об'єднати в єдиний провідний шар. У перехідному шарі можна припустити наявність провідного горизонту (з переважним значенням сумарної поздовжньої провідності понад 100 См), в якому місцями є "дірки" (тобто райони відсутності ОЗО). На більшій частині вивченої території сумарна поздовжня провідність товщі порід потужністю порядку 30—35 км, як правило, не перевищує 250 См. Кореляція площ поширення провідних об'єктів та графітоносних районів дає змогу припускати, що знижені опори в цих районах пов'язані з графітизацією порід, що складають як "гранітний", так і частину перехідного шару. Активні на сучасному етапі розвитку лінеаментні зони — Устьлузько-Малинська, Яворівсько-Волчанська (складова північної частини Дніпро-Лабської зони) і Мукачівсько-Дніпропетровська — супроводжуються провідними об'єктами, які розміщуються на різній глибині.

On the basis of one-dimensional inversion of MTS curves on the most part of the Volynsk and the western part of the Podolsk mega-blocks in a "granite" layer the objects of the lowered resistance (OLR) have been selected which at the present stage of researches are difficult for uniting in a uniform conductive layer. In a transitive layer it is possible to assume the presence of a conductive horizon (with prevailing values of total longitudinal conductivity more than 100 S), in which the places with "holes" are available (i. e. areas of absence OLR). On the most part of the investigated territory the total longitudinal conductivity of rocks with thickness of about 30—35 km basically does not exceed 250 S. Correlation of the area of distribution of conductive objects with graphitic rock by areas allows assumption, that the lowered resistance in these areas is explained by graphitization of rocks composing both "granite" and a part of transitive layer. Active at the present stage of development lineament zones — the Ustlugsko-Malinskaya, Yavorovsko-Volchansk (comprising the northern part of the Dnipro-Labe zone) and the Mukachevo-Dnepropetrovsk — zone are accompanied by conductive objects located at various depths.

**Введение.** На Украинском щите (УЩ) обнажаются (или находятся под молодым осадочным чехлом незначительной мощности) породы различных фаций метаморфизма (преимущественно амфиболитовой, реже гранулитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой) архейского, ранне- и среднепротерозойского возраста. Эти породы образовались при температурах и давлениях, соответству-

ющих глубине 7—37 км [Атлас ..., 2002; Беловцев и др., 2001; Курепин, 2003; Фации ..., 1970]. Создается впечатление, что эрозионный срез ( $\Delta H$ ) щита значителен [Курепин, 2003 и др.] и существенно изменяется от района к району в связи с различной амплитудой поднятий. Известно, что система широтных зон разломов на УЩ является более молодой по сравнению с диагональной системой: "... вре-

мя ее заложения относится к концу палеопротерозоя — началу мезопротерозоя." [Алехин, Гинтов, 2004]. В пределах этих зон концентрируются различные минерагенические ассоциации.

Поэтому вызывают интерес вопросы о связи перечисленных и других геологических данных с их геоэлектрическими характеристиками. Некоторые, пока предварительные, ответы можно получить основываясь только на площадных исследованиях методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ).

**Методика и используемые данные.** Подбор параметров глубинного геоэлектрического разреза основывался на одномерной инверсии обобщенных кривых зондирования. Для этой цели использовались инверсия Паркера [Parker, Whaler, 1981] (D+ алгоритм) и инверсия OCCAM [Constable et al., 1987]. В первом методе разрез представляется в виде слоев нулевой мощности, но конечной проводимости. Им может быть оценено значение суммарной продольной проводимости ( $S$ ) проводников, выделяемых в разрезе, причем для построения разреза используется кривая кажущихся сопротивлений во всем наблюдаемом диапазоне периодов одновременно. Второй метод заключается в подборе плавно изменяющихся по проводимости конечного числа слоев, аппроксимирующих экспериментальные данные. Инверсия OCCAM большой вес придает значениям фаз импеданса.

Известно, что гальваническое искажение магнитотеллурического (МТ) поля приводит к статическому смещению амплитудных кривых МТЗ. Для исключения этого эффекта кривые МТЗ нуждаются в нормализации, которая заключается в восстановлении нормального положения низкочастотных ветвей, отражающих электропроводность нижних частей тектоносферы. Предполагается, что на глубине более 400 км горизонтальные изменения электропроводности малы и кривые МТЗ, полученные в различных районах (в пределах расстояний длины волны), должны сливаться на периодах больше 3 ч. Обычно нормализация кривых заключается в смещении низкочастотных частей кривых МТЗ по вертикали до совмещения с опорной кривой зондирования, соответствующей региональному геоэлектрическому строению региона исследований. Для территории УЩ в качестве опорной кривой зондирования использованы результаты магнитовариационного зондирования (МВЗ), полученные по геомагнитным данным на observa-

тории "Киев" [Semenov, 1998]. Обобщенные кривые зондирования были получены путем совмещения кривых МТЗ в отдельных пунктах с опорной кривой МВЗ "Киев". Чтобы получить геоэлектрический разрез с минимальных глубин "гранитного" слоя для интерпретации использовались только кривые МТЗ, для которых фазовые данные начинались на периодах не более 1—10 с. Глубина проникновения МТ-поля составляет приблизительно  $0,1\sqrt{10\rho T}$ . При средней величине удельного электрического сопротивления ( $\rho$ , э. с.) поверхностных отложений порядка 10 Ом·м для указанного диапазона периодов начальную глубину исследований можно принять 1—2 км.

В работе используются результаты МТЗ, полученные производственными организациями МинГео УССР под руководством А. И. Ингерова [Атлас ..., 2002; Дьяконова и др., 1986; Ингеров и др., 1987] и В. И. Трегубенко [Трегубенко и др., 1989; 1994], а также сотрудниками ИГФ НАН Украины (с участием автора).

Общий обзор данных на щите показал, что для исследований наиболее подходит (на основе выбранных нами условий) западная часть щита в рамках 26,5—32,5° в. д. и 48—51,3° с. ш. (рис. 1). На этой площади располагаются Волинский, Подольский, Бугско-Росинский, Ингульский (западная часть) мегаблоки и Голованевская шовная зона. Были проанализированы кривые МТЗ приблизительно в 250 пунктах, которые крайне неравномерно распределены на исследуемой территории. Вся площадь была разбита на трапеции со сторонами 30' по долготе и 20' по широте. Размер сторон соизмерим с минимальной длиной волны используемых вариаций и позволяет воспользоваться данными о глубинах залегания сейсмических границ в земной коре, приведенными в работе [Гордиенко и др., 2005]. На исследуемой территории оказалось 93 трапеции, из которых полностью отсутствуют пункты наблюдений только в семи.

Обычно в используемых материалах МТЗ [Атлас ..., 2002; Дьяконова и др., 1986; Ингеров и др., 1987; Трегубенко и др., 1990; 1994] приводится оценка точности построения кривых МТЗ в пределах 10 %. При проведении инверсии нами была взята следующая погрешность индивидуальных значений: для кажущихся сопротивлений — 30 % (т.е. равная тройной ошибке определения параметра) и 5—10° для фаз импедансов. Такая погрешность в большинстве случаев обеспечивает согласование фазовых кривых МТЗ с данными МВЗ

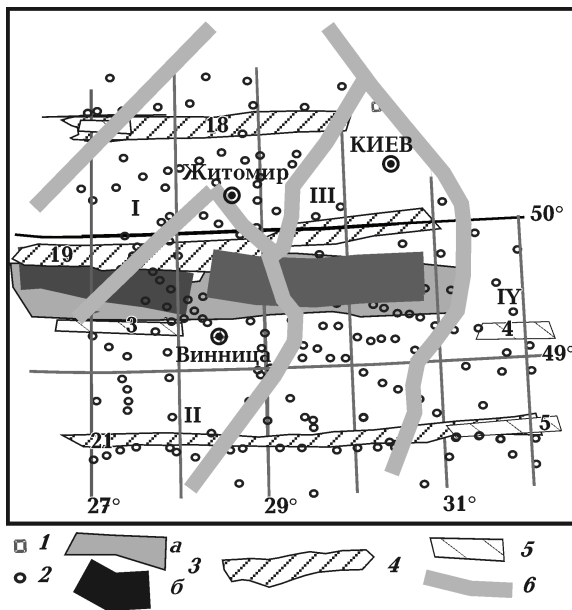


Рис. 1. Обзорная карта региона исследований: 1 — геомагнитная обсерватория "Киев", 2 — расположение пунктов наблюдений, 3 — Днепро-Лабская зона (ДЛ), выделенная по космическим снимкам [Быстревская, Пашкевич, 1979] (а), осевая часть зоны (б), 4 — активные на современном этапе развития линейные зоны [Верховцев, 2006] (Усть-лугско-Малинская (18), Яворовско-Волчанская (19), Мукачевско-Днепропетровская (21)), 5, 6 — зоны разломов (5 — основные широтные и их номера согласно [Алехин, Гинтов, 2004; Гинтов, 2005] (Хмельницкая (3), Смелянская (4), Субботско-Машоринская (5)), 6 — межмегаблоковые [Гинтов, 2005]); мегаблоки [Гинтов, 2005]: I — Волинский, II — Подольский, III — Бугско-Росинский, IV — Ингульский.

с точностью, которая позволяет предполагать, что определенные по инверсии D+ значения  $S$  являются максимально возможными, а глубина соответствует минимально возможной для кровли слоев. По инверсии ОССАМ определялись глубина залегания и значения у. э. с проводящих объектов.

**Результаты одномерной инверсии.** Полученные в результате одномерной инверсии геоэлектрические параметры (глубина, суммарная продольная проводимость, мощность, удельное электрическое сопротивление) используются при построении площадных моделей территории.

Поскольку МТ-методы имеют плохую разрешающую способность по отношению к высокоомным породам, точно определить их сопротивление невозможно. Поэтому предпочтительнее оценивать геоэлектрические пара-

метры величиной суммарной продольной проводимости. В этом случае, во-первых, легко сопоставить результаты обоих (ОССАМ и D+) методов инверсии, во-вторых, оценить меру отличия выделяемого слоя от вмещающих пород. Обозначим термином "интегральное  $S$ " значение, равное сумме  $S$  определенного интервала глубин.

Прежде чем строить площадные схемы, необходимо определить наиболее общие черты геоэлектрического строения рассматриваемой территории — наличие в земной коре слоев пониженного сопротивления, их распространение и геоэлектрические параметры.

Из результатов геоэлектрических исследований на постоянном и переменном токах, по лабораторным измерениям известно, что сопротивление пород, слагающих кристаллический фундамент, намного большее  $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Суммарная продольная проводимость слоя пород мощностью 5 км даже с минимальным сопротивлением  $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  составит порядка 5 См. По данным [Ингертов и др., 1987; Трегубенко и др., 1994] на большей части региона  $S$  поверхностных отложений, перекрывающих кристаллические породы, менее 10 См. Таким образом, можно считать, что слой, имеющий  $S$  в четыре—пять раз превышающую интегральное  $S$  вышележащих пород, достоверно может быть выделен в виде проводящего объекта.

На основании вышесказанного под слоем пониженного сопротивления принимается слой, если он фиксируется на основании инверсии D+ (значения  $S$  не менее 40 См) и имеет сопротивление (определяемое по инверсии ОССАМ) не менее чем в 3 раза меньшее (т. е.  $< 200\text{—}300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), чем вмещающие его породы.

Весь регион исследований был разбит на три площади. Первая, северная, площадь (VI) полностью совпадает с Волинским мегаблоком ( $26,5\text{—}30^\circ$  в. д.  $\times$   $50\text{—}51,3^\circ$  с. ш.). Общее количество пунктов около 65. Вторая (RI) площадь ( $26,5\text{—}28,2^\circ$  в. д.  $\times$   $48,3\text{—}50^\circ$  с. ш.) охватывает территорию западной части Подольского мегаблока (всего около 45 пунктов), третья (RII) площадь ( $28,75\text{—}31,5^\circ$  в. д.  $\times$   $48,3\text{—}50^\circ$  с. ш.) пространственно перекрывает восточную часть Подольского мегаблока, Бугско-Росинский, Ингульский (западная часть) мегаблока и Голованевскую шовную зону (всего около 120 пунктов). Из рассмотрения выпадает полоса шириной приблизительно 40 км в центре Подольского мегаблока (см. рис. 1),

что связано с наличием электрофицированных железных дорог, помехи от которых не дают возможности качественно измерить электрические поля и, следовательно, построить кривые МТЗ.

На рис. 2 представлены полученные геоэлектрические параметры для условно "гранитного" и переходного (иногда называемого "диоритовый") слоев. Здесь и далее принято традиционное деление земной коры на "гранитный" ( $V_p \leq 6,4$  км/с), переходный ( $V_p \leq 6,8$  км/с) и "базальтовый" ( $V_p \leq 7,2$  км/с). Условность определяется тем, что легко можно отнести геоэлектрические параметры к тому или иному слою по данным инверсии D+ (так как определяется только глубина залегания кровли слоя). В случае инверсии ОССАМ определяется мощность слоя и поэтому кровля может находиться в одном слое, а подошва — в другом. Кроме того, само распределение мощности слоев земной коры по

площади построено весьма приблизительно в виду отсутствия площадных сейсмических исследований. Наименее достоверные данные инверсий имеются для "базальтового" слоя, так как диапазон периодов наблюдений на большинстве пунктов позволяет достоверно выделить проводящие объекты лишь до глубин 30—35 км, что для большей части площади соответствует глубине залегания подошвы переходного слоя (см. рис. 1).

На площади VL мощность "гранитного" слоя земной коры изменяется от 9—10 км на севере Волынского мегаблока до 15—16 км — на юге; подошва промежуточного слоя залегает на глубине от 19—20 км на севере мегаблока и до 30—31 км — на юге (см. рис. 2). Мощность "гранитного" слоя на площади RI изменяется от 13 до 16 км (северо-восточнее Винницы до 18—20 км); подошва промежуточного слоя залегает на глубине 31—33 км. На площади RII мощность "гранитного" слоя из-

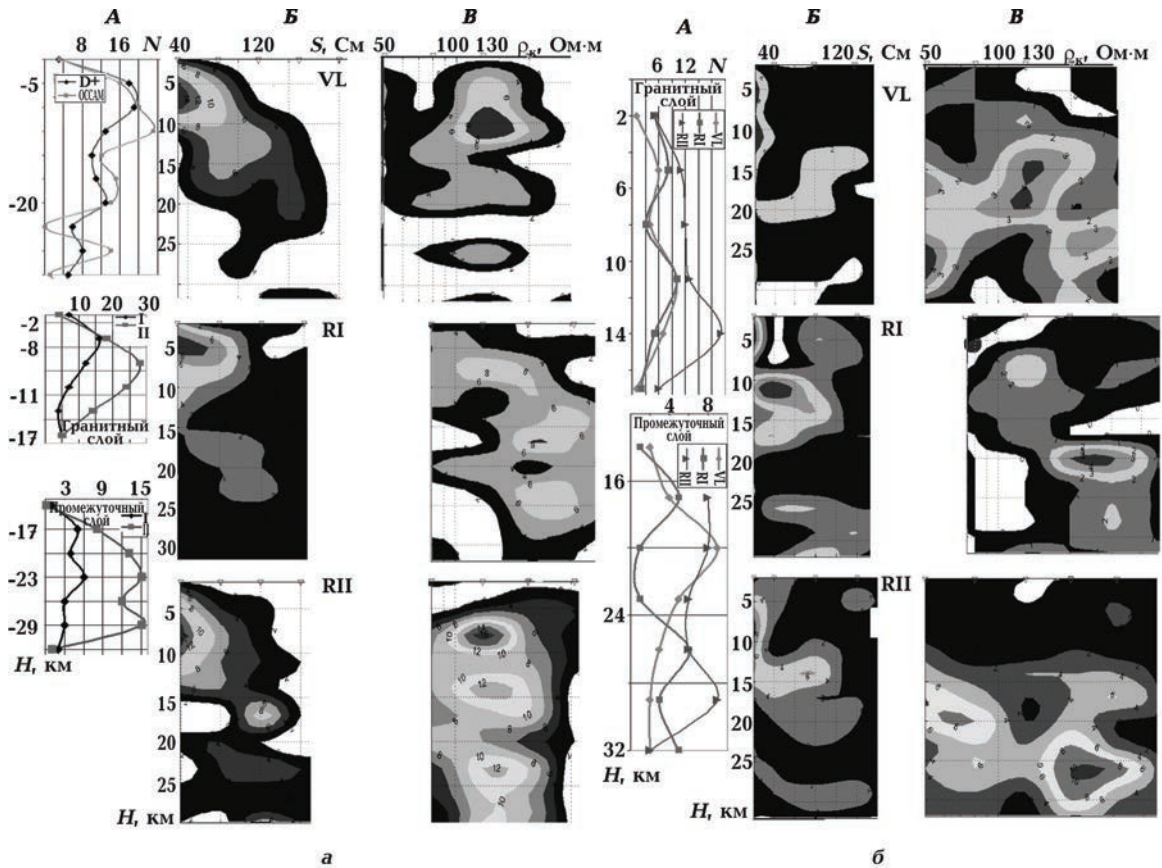


Рис. 2. Параметры проводников по данным инверсии кривых МТЗ-ВЗ (а) и МТЗ-СЮ (б): А — зависимость расположения проводников от глубины для трех площадей, Б, В — распределение по глубине значений суммарной продольной проводимости проводников и у. э. с. (по данным D+ (Б), по данным ОССАМ (В)); N — количество пунктов.

меняется от 13 км до 17 км, самые маленькие мощности наблюдаются в южной и западной частях; подошва промежуточного слоя залегает на глубине 26—30 км.

Рассмотрим сначала результаты инверсий кривых МТЗ-ВЗ. Как видно из рис. 2, а, на всей территории уверенно выделяется (практически в половине пунктов) проводник в "гранитном" слое. Оценки глубины залегания проводника, выполненные для кривых МТЗ-ВЗ по инверсиям D+ и ОССАМ для Волынского мегаблока, хорошо согласуются. Верхние кромки, согласно инверсии D+ кривых МТЗ-ВЗ, залегают на глубинах от 4—5 км на площадях VI и RI, до 5—9 км — на RII. Центральные части проводников, согласно ОССАМ, залегают чуть глубже.

Аналогичная картина наблюдается и для результатов инверсий по кривым МТЗ-СЮ (рис. 2, б). Однако по этим кривым в "гранитном" слое выделяются два интервала с проводниками. Первый на глубине 5—6 км на всех площадях, второй — на 11 км на VI, RI и на 14 км на площади RII.

Из 62 пунктов, взятых для инверсий на площади VI, в "гранитном" слое отсутствуют проводники в 12 пунктах МТЗ-ВЗ и 20 МТЗ-СЮ, причем для последних нарушено амплитудно-фазовое согласие (афс) в 17 пунктах; из 43 пунктов на площади RI в 2 пунктах МТЗ-ВЗ и в 11 МТЗ-СЮ (соответственно афс нарушено в 2 и 7); на площади RII из 120 пунктов МТЗ-ВЗ в 11 (в 9 нарушено афс) и из 94 пунктов МТЗ-СЮ в 25 (в 11 нарушено афс). В переходном слое проводники отсутствуют в 7 пунктах МТЗ-ВЗ и в 19 пунктах МТЗ-СЮ (в 18 нарушено афс) на площади VI; в 14 пунктах МТЗ-ВЗ и в 11 МТЗ-СЮ (в 8 нарушено афс) на площади RI; в 31 МТЗ-ВЗ (в 10 нарушено афс) и в 28 МТЗ-СЮ (в 13 нарушено афс) на площади RII.

Общее количество пунктов, на которых выделяется проводник, и их пространственное расположение на всех площадях свидетельствуют о локальности проводников по площади. Поэтому будем называть выделяемые проводники термином "объект пониженного сопротивления" (ОПС).

Проанализируем геоэлектрические параметры проводников в "гранитном" слое. Обозначим интервал глубин, в котором выделяются ОПС через  $L_1$ . В случае нескольких интервалов будем обозначать их как  $L_{1a,b}$ . В большинстве пунктов значения интегрального  $S$  (рис. 2, Б) для проводников в "гранитном" слое

(независимо от поляризации кривых МТЗ) лежат в интервале от 20 до 120 См. Первое отличие заключается в том, что для кривых МТЗ-СЮ проводники отсутствуют приблизительно в два раза большем количестве пунктов. Второе — значения интегрального  $S$  для  $L_{1a}$  (интервал 5—6 км) в основном меньше 40 См (т.е. меньше пороговой величины, выбранной нами для уверенного выделения проводников), тогда как для МТЗ-ВЗ они достигают 100 См. Объекты пониженного сопротивления для  $L_{1b}$  (интервал 10—14 км) четче проявляются по инверсии кривых МТЗ-СЮ, хотя намеки на существование их есть и по инверсии МТЗ-ВЗ. Значения интегрального  $S$  для  $L_{1b}$  достигают 100 См.

Значения удельного электрического сопротивления ОПС меняются в широком диапазоне (рис. 2, В). Для площадей VI и RI обе поляризации у. э. с. изменяются приблизительно одинаково в пределах 100—200 Ом·м для  $L_{1a,b}$ , для площади RII — в тех же пределах 100—200 Ом·м (по МТЗ-ВЗ), по МТЗ-СЮ у. э. с. практически для всего "гранитного" слоя не имеет преимущественного значения (20—500 Ом·м).

На меньшем количестве пунктов можно предположить наличие еще двух интервалов глубин (по обеим поляризациям) с ОПС:  $L_2$  (примерно в 30 % пунктов) на глубине 16—20 км и  $L_3$  (четче выделяемый по данным ОССАМ) — на 22—26 км. Анализ показывает, что в интервале глубин 16—18 км (т.е. в верхней части промежуточного слоя) ОПС выделяется чаще на пунктах (в 11 из 29), расположенных в северной части Волынского и западной части Подольского мегаблоков УЩ. На остальных площадях объекты в  $L_2$  также располагаются в верхней части переходного слоя. Значения интегрального  $S$  изменяются от 80 до 120—150 См (на площади R II в интервале 100—150 См) для МТЗ-ВЗ и от 40 до 100 См для МТЗ-СЮ. Значения у. э. с. меняются в широких пределах. На Волынском мегаблоке от 70—80 до 200 Ом·м (для обеих поляризаций); на площади RI от 180 до 350 Ом·м (для обеих поляризаций); на RII от 50 до 310 Ом·м (МТЗ-ВЗ) и от 80 до 280 Ом·м (МТЗ-СЮ).

Проводники в  $L_3$  неравномерно выделяются как по поляризациям, так и по площади. На Волынском мегаблоке ОПС слабо отражаются по значениям интегрального  $S$  (для обеих поляризаций), но четко проявляются по значениям у. э. с. 100—200 Ом·м для МТЗ-ВЗ по двум экстремумам для МТЗ-СЮ в интер-

вале 20—80 Ом · м и 200—300 Ом · м. На площади R1 ОПС выделяется приблизительно в 10 % пунктов (по обеим поляризациям). По значениям интегрального  $S$  ОПС практически не проявляются по МТЗ-ВЗ, а по МТЗ-СЮ значения  $S$  не превышают 80 См (у. э. с. ОПС для обеих поляризаций одинаковы: 180—340 Ом · м). На площади RII ОПС проявляются по обеим поляризациям. Значение интегрального  $S$  составляет 80—120 См (для МТЗ-ВЗ и МТЗ-СЮ), а у. э. с. изменяется в интервале 120—220 Ом · м для МТЗ-ВЗ и 160—400 Ом · м для МТЗ-СЮ.

Мощность ОПС редко превышает 4 км. При относительно высоких сопротивлениях ОПС (в основном больших 100 Ом · м) значения  $S$  каждого проводника не превысит 40 См. Проводники с такими геоэлектрическими параметрами мало пригодны для выделения методом МТЗ. Поэтому при построении площадных схем распределения интегрального  $S$  минимальное значение изолинии принималось 40 См.

**Схемы распределения геоэлектрических параметров.** Анализ распределения значений  $S$  на исследуемой территории показал, что ни для одного отдельного интервала глубин нельзя найти площадь, на которой можно было бы провести хотя бы одну замкнутую изолинию  $S$ , обоснованную по правилам картографии. Оказалось возможным построить только карты значений интегральной  $S$  для всей мощности "гранитного" ( $S_{гр}$ ) и промежуточного ( $S_{пр}$ ) слоев. Отнесение ОПС к тому или иному слою коры проводилось в соответствии с мощностью слоев в каждой трапеции (см. рис. 1). При таком подходе имеются данные почти для 90 % всех пунктов и появилась возможность проведения изолиний.

**Результаты инверсии кривых МТЗ-ВЗ** (рис. 3, а). Как было показано выше, на большинстве пунктов значение  $S_{гр}$  изменяется в диапазоне 40—120 См, а  $S_{пр}$  от 80 до 180 См (см. рис. 2, а). В соответствии с этим на схемах была сделана попытка провести изолинии 40, 70, 100 См для "гранитного" и 100, 140 См для переходного слоев. При проведении изолиний соблюдалось правило — чтобы внутри площади находилось не менее трех пунктов со значениями  $S$ , превышающими значение изолинии.

При построении оказалось, что изолинию 40 См провести затруднительно. Поэтому были выделены площади, внутри которых либо отсутствуют ОПС, либо  $S < 40$  См. Большая часть таких участков в "гранитном" слое распола-

гается субмеридионально на территории Подольского и прилегающих к нему с востока мегаблоков. В переходном слое эти участки располагаются в центральных частях Волынского и Подольского и на севере Росинско-Тикичского мегаблоков.

Как видно из рис. 3, А, для "гранитного" слоя достаточно уверенно выделяются площади, на которых значения  $S_{гр}$  превышают 70 и даже 100 См. На основании этого можно сказать, что на большей части территории Волынского и западной части Подольского мегаблоков в "гранитном" слое имеются ОПС.

Для переходного слоя можно провести только одну изолинию 100 См (рис. 3, Б), которая разделяет площади с меньшими и большими значениями  $S$ . В то же время площади, где ОПС отсутствуют или значения  $S_{пр} < 40$  См, в этом слое занимают меньшее пространство, чем области с ОПС. В этом случае можно говорить о наличии в переходном слое исследуемой территории проводящего горизонта (с преобладающим значением  $S_{пр}$  более 100 См), в котором местами имеются "дыры" (т. е. районы отсутствия ОПС).

На рисунках также показаны пункты, на которых значения  $S$  в 4 раза превышают пороговое (40 См). Для "гранитного" слоя намечается две ветви, расходящиеся от Новоград-Волынского: на северо-запад в направлении на Дымер на юго-восток в направлении на Бердичев и далее на восток на Сквиру и Богуслав. Подобные повышенные значения  $S$  встречаются и в других местах исследуемой территории, но они выделяются на локальных участках с линейными размерами менее 40 км. В переходном слое пункты с повышенными значениями  $S$  пространственно занимают большую площадь. Можно выделить как бы три полосы повышенных значений  $S_{пр}$ . Первая по направлению близка к юго-восточной ветви, выделенной для "гранитного" слоя, но несколько сдвинута к северу. Вторая обрамляет с запада Коростенский плутон (пространственно совпадая с повышенными значениями  $S_{пр}$ ) и далее протягиваясь через Радомышль на Богуслав. Третья начинается на юге от линии Могилев-Подольский — Ямполь и далее на север на Тульчин и Сквиру. В эту зону попадают и пункты с повышенными значениями  $S_{пр}$ .

**Результаты инверсии кривых МТЗ-СЮ** (рис. 3, б). По данным инверсии этого типа кривых МТЗ в "гранитном" слое на большей части исследуемой территории ОПС или нет,

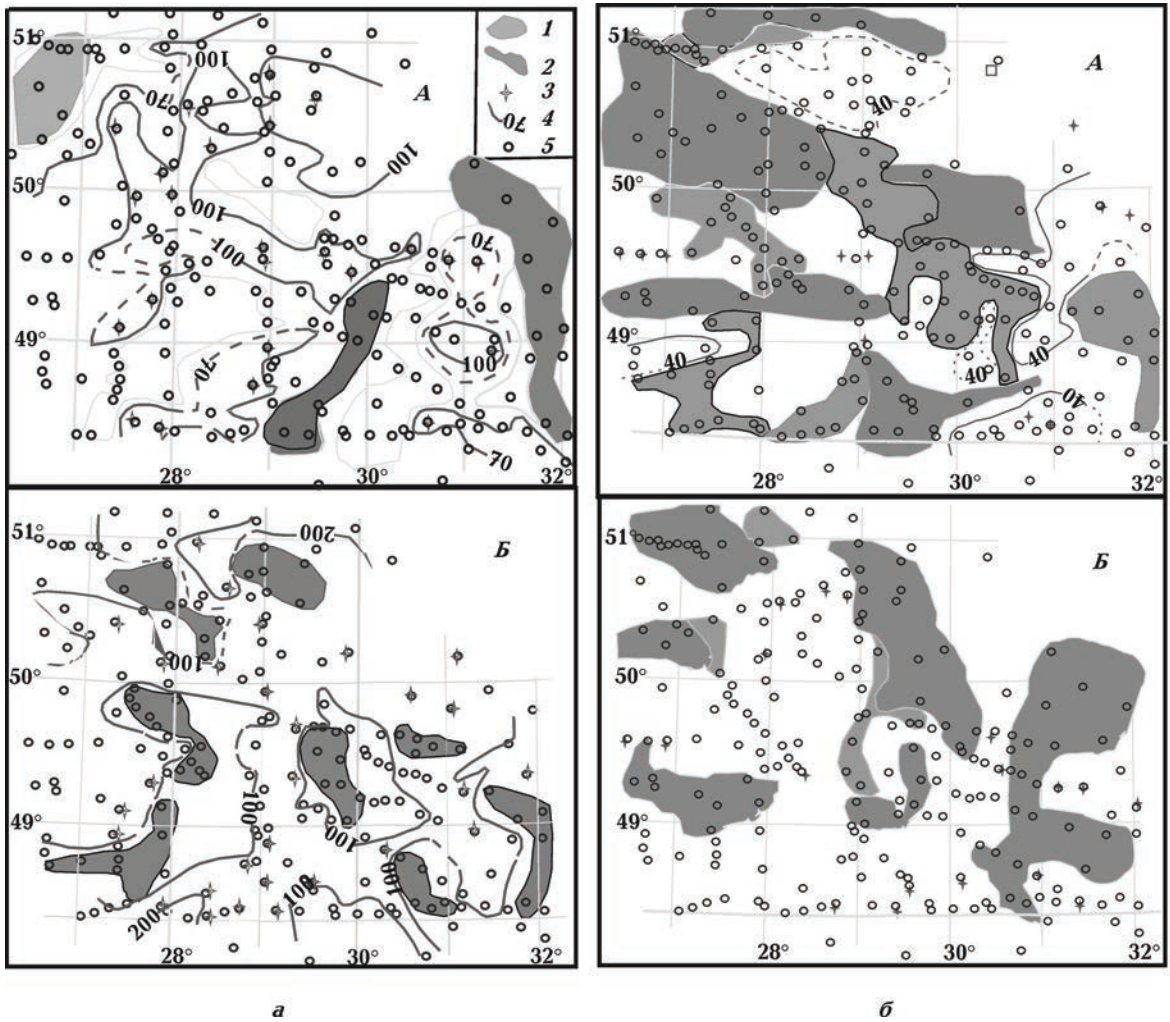


Рис. 3. Схемы распределения интегральной проводимости "гранитного" (А) и переходного (Б) слоев по данным инверсии D+ кривых МТЗ-ВЗ (а) и МТЗ-СЮ (б): 1—3 — площади отсутствия проводников (1), со значениями  $S$  менее 40 См (2) и более 160 См (3), 4 — изолинии  $S$  (пунктир — предполагаемые), 5 — пункты наблюдений.

или их значения  $S_{\text{пр}}$  менее 40 См. Отдельные районы (протяженностью 150—200 км при ширине 15—40 км), ОПС в которых превышает 40 См, располагаются вдоль линии Новоград-Волынский — Дымер, южнее границы между Волынским и Подольским мегаблоками, вдоль линии Умань — Канев, вдоль линии Гайворон — Новомиргород.

В переходном слое на большей части Подольского и центре Волынского мегаблоков имеются ОПС со значениями  $S_{\text{пр}}$  превышающими 40 См. В то же время ОПС отсутствуют почти на 40 % всей территории исследований.

Применение выбранной методики показало, что действительно на рассматриваемой

площади могут быть выделены объекты пониженного сопротивления и получены общие оценки их геоэлектрических параметров.

**Сопоставление полученных результатов с геологическими и другими геофизическими данными.** Проведенный ранее анализ влияния различных проводящих элементов на у. э. с. горных пород [Гордиенко, 2001] показал, что для возникновения крупных объектов пониженного сопротивления (размером в десятки квадратных километров и больше) основное значение имеют поровые и трещинные воды, включения графита и рудных минералов. В зонах современной активизации проводящие объекты могут быть обусловлены наличием расплава в средней части коры

и магматических флюидов, также понижающих у. э. с. пород.

**Влияние содержания воды.** В породах кристаллического фундамента распространены заполняющие трещины воды, о концентрации которых можно судить по естественным ресурсам подземных вод щита [Водообмен ..., 1989]. Среднее содержание воды в кристаллических породах УЩ незначительно (около 0,2 %), а минерализация в исследуемом регионе составляет 0,5 г/л. На рассматриваемой территории западную половину Подольского мегаблока занимает область, в пределах которой ресурсы в 2—7 раз превосходят распространенные на остальной части региона. В этой области можно ожидать некоторого сокращения у. э. с. верхней части разреза кристаллического фундамента, но значения  $S_{\text{гп}}$  не указывают на прямую корреляцию ОПС с повышением ресурсов подземных вод (около 40 % области приходится на зоны отсутствия ОПС или со значениями  $S_{\text{гп}}$  менее 40 См).

**Связь с графитизацией пород.** На щите выделены области графитизации пород от зеленосланцевой до гранулитовой фаций метаморфизма [Яценко, 1998]. На локальных участках месторождений и рудопроявлений графита его концентрация ( $C$ ) достигает 15—20 % (редко 30 %) [Яценко, 1998; Радзивилл, 1994]. Размеры этих зон невелики и несколько таких локальных скоплений графита объединяются в графитоносные районы. Пржилки графита в кристаллических породах УЩ при обычном содержании воды (около 0,2 %), как правило, не составляют связной системы ( $C \approx 1 \div 10$  %) и определяемое ими у. э. с. пород можно оценить по эмпирической формуле  $\rho = 0,025C^{-1,78}$  [Гордиенко, 2001]. Концентрацию графита в пределах районов можно оценить в первые проценты (что примерно соответствует у. э. с. в первые десятки омметров), а в пределах областей графитизации среднее содержание минерала оценивается в 0,5—1 % (что соответствует величине у. э. с. около 100 Ом · м).

Распространение зон графитизации на глубину неясно. Однако данные о величине эрозионного среза УЩ [Курепин, 2003] показывают, что на соседних участках внутри рассматриваемых областей могут встречаться графитизированные породы с разной степенью метаморфизма, образованные на глубине 5—13 км. Эти породы образованы и в средней части коры (на глубине до 34 км). Поэтому не исключено, что фиксируемая в

приповерхностном слое графитизация продолжается (вероятно, с перерывами по вертикали) и на значительных глубинах.

Были сопоставлены данные о графитизации пород с распределением  $S_{\text{гп}}$  и  $S_{\text{гп}}$  по МТЗ-ВЗ. Как видно из рис. 4, на исследуемой территории расположены основная часть Центральной и Северо-Западная графитоносные области. На большей части области I (рис. 4, а) в "гранитном" слое выделяются ОПС, значения  $S_{\text{гп}}$  которых превышает 70 См, а из 22 пунктов с  $S_{\text{гп}} > 160$  См в эту область попадает

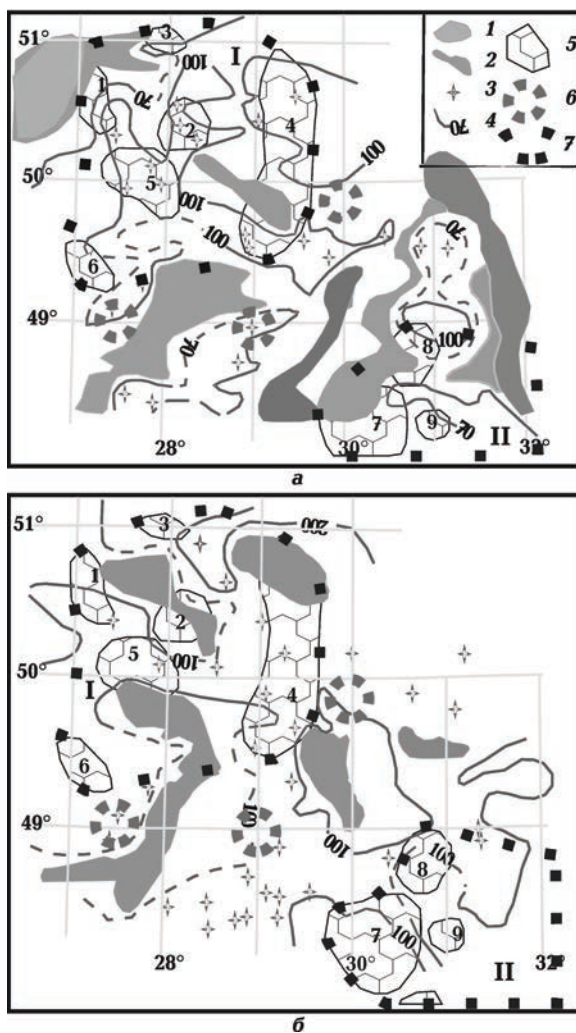


Рис. 4. Сопоставление карт  $S_{\text{гп}}$  (а) и  $S_{\text{гп}}$  (б) по МТЗ-ВЗ с распределением графитизации: 1—4 — обозначения те же, что и на рис. 3; 5—7 — контуры графитоносных областей (5) (Северо-Западная (I), Центральная (II)), графитоносных районов (6) (Буртынский (1), Букинский (2), Теньковский (3), Кочерово-Погребещенский (4), Любарский (5), Верхнебугский (6), Среднебугский (7), Усть-Тикицкий (8), Синюхинский (9), по [Яценко, 1998]), проявлений графитизации (7), по [Радзивилл, 1994].



13 (из них один в 1, три во 2 и 5, пять в 4 район). Аналогичная картина наблюдается и в переходном слое, но здесь на меньшей площади выделяются ОПС с  $S_{гр} > 70$  См и всего в 11 пунктах (из них один в 1 и 5, пять в 4 район) из 33 значения  $S_{гр} > 160$  См. Такой характер корреляции позволяет предполагать, что пониженные сопротивления на указанной площади объясняются графитизацией пород, слагающих как "гранитный", так и часть переходного слоя.

В области II наблюдается совершенно другой характер связи ОПС с графитизацией. В "гранитном" слое ОПС с  $S_{гр} > 70$  См находятся в центральной части и на небольшой площади в северной части области. В северо-западной и северо-восточной частях ОПС либо отсутствуют, либо значения  $S_{гр}$  менее 40 См. Необходимо отметить, что в Среднебугском графитоносном районе имеется известнейшее месторождение графита (р-н Завалья). В этом районе наблюдается комплекс геоэлектрических неоднородностей (Ряснопольская [Дьяконова и др., 1986] или Гайворон-Добровеличковская [Бурьянов и др., 1987] аномальная зона), которые имеют двумерный характер. Объекты этих неоднородностей начинаются непосредственно у поверхности консолидированного фундамента и уходят на большую глубину. Кривые МТЗ, отражающие подобные двумерные структуры, не интерпретировались по методике одномерной инверсии. В переходном слое на всей площади наблюдаются ОПС, а в северной части значения  $S_{гр}$  превышают 100 См. Площадью с отсутствием объектов пониженного сопротивления в слое нет. Таким образом, можно предполагать, что пониженные сопротивления в пределах области II объясняются графитизацией пород, слагающих как "гранитный", так и переходный слой.

**Связь с источниками магнитных аномалий.** Для исследования вопроса о связи ОПС со скоплениями рудных минералов проведено сопоставление карт интегральной  $S$  с распространением объектов региональных аномалий магнитного поля при величине их намагниченности более 3 А/м. При такой величине намагниченности количество рудных элементов может достигать 10 % и вызвать понижение у. э. с. пород коры. Верхние кромки объектов II и III залегают на глубине порядка 10 км, т. е. в "гранитном" слое. Глубина залегания верхней кромки объекта I, расположенного в западной части Волынского ме-

габлока, находится на глубине 12—16 км (т. е. практически на границе "гранитного" и переходного слоев) и, следовательно, основная часть объекта находится в переходном слое.

Магнитный объект I пространственно практически весь располагается в северо-западной части графитоносной области I, перекрывая районы 1 и частично 2 и 5. Восточная половина магнитного объекта III полностью перекрывает территорию графитоносного района 7 области II. Поэтому трудно сказать что-либо новое об этих районах.

Как видно из рис. 5, в "гранитном" слое с центральными частями магнитного объекта II коррелируют области либо полного отсутствия ОПС, либо с ОПС, имеющими  $S_{гр} < 40$  См. Лишь в краевых частях объекта появляются

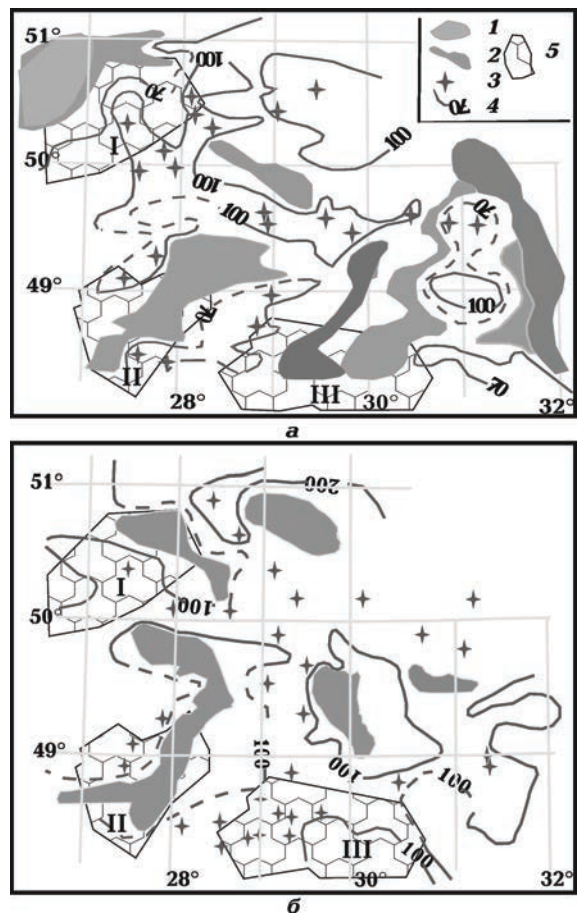


Рис. 5. Сопоставление распределения интегральной проводимости "гранитного" (а) и переходного (б) слоев с распространением объектов региональных аномалий магнитного поля [Орлюк, 2000]: 1—4 — обозначения те же, что и на рис. 3, 5 — проекции на земную поверхность глубинных магнитных объектов I, II, III.

ОПС с  $S_{гр} > 70$  См, а в западной части есть один пункт со значением  $S_{гр} > 160$  См. В переходном слое наблюдается совершенно иная картина. С западными частями магнитных объектов II и III коррелируют повышенные значения  $S_{гр}$ , а в двух пунктах объекта II и в десяти объекта III значения  $S_{гр} > 160$  См.

**Отражение активных широтных зон разломов в геоэлектрических параметрах.** Для ответа на поставленный вопрос были построены геоэлектрические разрезы вдоль меридиональных профилей, проведенных через  $0,5^\circ$ . На разрезах (рис. 6) показаны только те проводящие объекты, у. э. с. которых не превышает  $160$  Ом · м.

На всех профилях от  $27$  до  $29,5^\circ$  выделяются проводящие объекты, тяготеющие к северной границе Устьлугско-Малинской линейной зоны (с этой зоной практически сливается Владимир-Волынская зона разломов [Гинтов, 2005]). На территории УЩ объекты залегают на глубине более  $10$  км, а на западной окраине щита глубина резко уменьшается. Удельное электрическое сопротивление всех ОПС больше  $60$  Ом · м. С южной границей зоны подобная тесная связь не наблюдается, хотя на большей части профилей ОПС выделяются.

Полоса шириной около  $90$  км южнее  $50^\circ$  ш. (см. рис. 1) представляет собой линейную широтную зону разломов, особенности строения которой несколько отличаются у разных авторов. Рассмотрим различные ее части: северную (Яворовско-Волчанскую), цент-

ральную (Днепро-Лабскую) и южную (Хмельницкую).

В Яворовско-Волчанской и Днепро-Лабской зонах проводящие объекты перестают выступать в виде локальных, как это было в Устьлугско-Малинской зоне. На участке от  $28$  до  $31^\circ$  они могут быть представлены в виде слоя шириной около  $50$  км, который либо расположен в северной части Яворовско-Волчанской зоны (на участке от  $27$  до  $29^\circ$ ), либо перекрывает Яворовско-Волчанскую и Днепро-Лабскую зоны (на участке от  $29,5$  до  $30,5^\circ$ ). Западнее  $27,5^\circ$  и восточнее  $30,5^\circ$  к южной границе зоны тяготеют локальные ОПС. По глубине залегания проводники расположены на двух этажах — первый в "гранитном" слое на глубине менее  $15$  км, второй на границе переходного и "базальтового" слоев.

Трудно провести корреляцию ОПС в целом с Хмельницкой разломной зоной. На западном склоне УЩ (профиль  $27^\circ$ ) проводники образуют зону шириной порядка  $100$  км, пространственно расположенную в пределах Подольского мегаблока южнее межмегаблокового разлома, разделяющего Волынский и Подольский мегаблоки. На следующем к востоку профиле  $27,5^\circ$  отсутствуют экспериментальные данные в районе зоны. На профиле  $28^\circ$  в зоне разлома имеются два пункта наблюдений, на которых отсутствуют ОПС во всей толще земной коры.

Более детальное изучение всей этой широтной полосы требует более тщательного дальнейшего анализа.

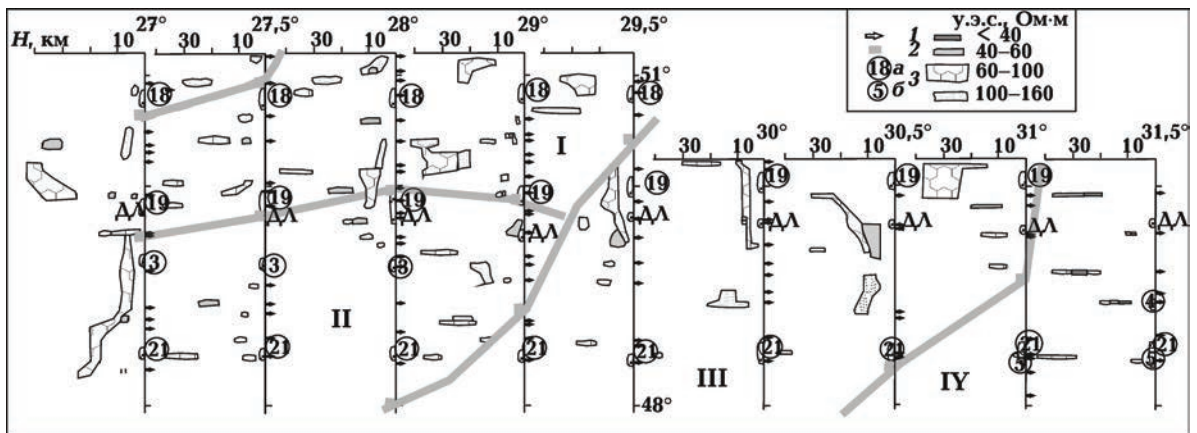


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы вдоль меридиональных профилей: 1 — пункты наблюдений, 2 — межмегаблоковые разломные зоны, 3 — активные на современном этапе развития линейные зоны (а) Устьлугско-Малинская (18), Яворовско-Волчанская (19), Мукачевско-Днепропетровская (21)); 3 — зоны широтных разломов (б) Хмельницкая (3), Смелянская (4), Субботско-Машоринская (5); ДЛ — ось Днепро-Лабской зоны.

Смелянская зона разломов пересечена одним профилем  $31,5^\circ$ , на котором в указанной зоне выделен ОПС в "гранитном" слое, причем у. э. с. верхней части составляет менее 40 Ом·м, что в большей мере соответствует локальным аномально-проводящим объектам. Изучение зоны в восточном направлении затруднено наличием электрифицированной железной дороги [Логвинов и др., 2008].

Вдоль Мукачевско-Днепропетровской зоны проводники выделены на большинстве профилей (за исключением  $28^\circ$  и  $31^\circ$ ), но расположены они неравномерно относительно зоны как вдоль ее простирания, так и по глубине.

Субботско-Машоринская зона пересечена одним профилем в своем западном окончании, но ее возможное продолжение на запад практически сливается с Мукачевско-Днепропетровской зоной вплоть до меридиана  $29,5^\circ$ . Складывается впечатление, что в пределах собственно Субботско-Машоринской зоны можно выделить ОПС в верхней части "гранитного" слоя. Этот вывод согласуется с результатами, полученными ранее [Логвинов и др., 2008].

**Выводы.** Результаты выполненного анализа показали, что на основе использованных данных могут быть получены общие закономерности геоэлектрического строения "гранитного" и переходного слоев земной коры региона. На большей части территории Волинского и западной части Подольского мегаблоков в "гранитном" слое имеются объекты пониженного сопротивления, которые на современном этапе исследований трудно объединить в единый проводящий слой. В переходном слое площади без ОПС или со значениями  $S_{\text{пр}} < 40$  См занимают меньшее пространство, чем области с ОПС, что позволяет говорить о наличии в слое проводящего горизонта (с преобладающим значением  $S_{\text{пр}} > 100$  См),

в котором местами имеются "дыры" (т. е. районы отсутствия ОПС). На большей части изученной территории суммарная продольная проводимость толщи пород мощностью порядка 30—35 км в основном не превышает 250 См.

Характер корреляции площади распространения проводящих объектов с графитоносными районами позволяет предполагать, что пониженные сопротивления в этих районах объясняются графитизацией пород, слагающих как "гранитный", так и часть переходного слоев.

Менее уверенно намечается корреляция ОПС с повышенным содержанием рудных элементов, обуславливающих региональные магнитные аномалии.

Наиболее выразительно в геоэлектрическом строении проявляется Днепро-Лабская зона разломов, северная часть которой сопровождается активной на современном этапе развития линеamentной Яворовско-Волчанской зоной. Здесь проводящие объекты могут быть представлены в виде слоя шириной около 50 км с кровлей на глубине 16—18 км. Кроме того, ОПС имеются и на границе переходного и "базальтового" слоев.

Полученные геоэлектрические схемы, конечно, нельзя считать окончательными. Во-первых, кривые МТЗ, выполненные производственными организациями, построены только до периодов 900 с, что недостаточно для корректного построения глубинных моделей. Во-вторых, на исследуемой площади явно присутствуют локальные двумерные аномалии с простиранием под различными азимутами. В случае, если простирание аномалий не согласуется с азимутом измерительных линий экспериментальных МТЗ, интерпретация таких данных любой моделью (1D или 2D) дает искаженный результат.

### Список литературы

- Алехин В. И., Гинтов О. Б. Кинематические особенности, фазы развития и металлогения системы широтных зон разломов Украинского щита // Геофиз. журн. — 2004. — 26, № 6. — С. 83—101.
- Атлас. Глибинна будова літосфери та екогеологія України / Ред. М. М. Байсарович, О. Ю. Митропольський, І. С. Чуприна. — Киев: Вид. ІГН НАН України, 2002. — 55 с.
- Белевцев Р. Я., Дудко В. С., Белевцев А. Р. Диффузионный массоперенос при метаморфизме в докембрии. — Киев: Наук. думка, 2001. — 204 с.
- Бурьянов В. Б., Гордиенко В. В., Завгородняя О. В., Кулик С. Н., Логвинов И. М., Шуман В. Н. Геофизическая модель тектоносферы Европы. — Киев: Наук. думка, 1987. — 184 с.

- Быстревская С. С., Пашкевич И. К.* О глубинной трансрегиональной зоне длительной активизации в пределах Восточно-Европейской платформы // Геол. журн. — 1979. — № 6. — С. 106—112.
- 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 Київ. ун-та, 2006. — С. 129—137.
- Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в естественных условиях / Отв. ред. В. М. Шестопапов.* — Киев: Наук. думка, 1989. — 288 с.
- Гинтов О. Б.* Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. — Киев: Феникс, 2005. — 572 с.
- Гордиенко В. В.* Природа коровых и мантийных проводников // Геофиз. журн. — 2001. — **23**, № 1. — С. 29—39.
- 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: Корвин 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., Бугримов Л. П., Рокитянский И. И., Колдунов А. А.* Результаты региональных исследований МТЗ по профилю Ужгород — Луганск. — Киев: Геоинформ, 1987. — 275 с.
- Курепин В. А.* Эрозионный срез гранулитовых мегаблоков Украинского щита по данным геологической термобарометрии // Минерал. журн. — 2003. — № 5/6. — С. 88—94.
- Логвинов И. М., Гордиенко В. В., Гордиенко И. В.* Исследование Смелянской и Субботско-Мошоринской зон разломов вдоль сейсмического профиля Канев — Николаев // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 3. — С. 56—65.
- Орлюк М. И.* Пространственные и пространственно-временные магнитные модели ранговых структур литосферы континентального типа // Геофиз. журн. — 2000. — **22**, № 6. — С. 148—165.
- Рагзвилл А. Я.* Углеродистые формации и тектоно-магматические структуры Украины. — Киев: Наук. думка, 1994. — 175 с.
- Трегубенко В. И., Мегедь Г. В., Горняк З. В., Василенко В. А.* Результаты площадной съемки МТЗ м-ба 1 : 2 500 000 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.
- Фации метаморфизма / Под ред. В. С. Соболева.* — Москва: Недра, 1970. — 432 с.
- Яценко В. Г.* Закономерности пространственного расположения проявлений графита на Украинском щите // Аспекты минерогенеза Украины. — Киев: Изд. ГНЦ РОС, 1998. — С. 254—270.
- 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.
- Semenov V. Yu.* Regional conductivity structures of the Earth's mantle // Publish. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. — 1998. — С-65 (302). — 122 p.