

Обзор наблюдений МВП—МТЗ в южной части Кировоградской аномалии электропроводности и первый опыт пленочного моделирования структуры Украинского щита

© *И.И. Рокитянский*¹, *А.В. Терёшин*¹, *В.И. Трегубенко*²,
*Н.С. Голубцова*³, *А.И. Ингеро*⁴, *Т.С. Савченко*¹, 2012

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Украинский государственный геологоразведочный институт,
Киев, Украина

³Московский государственный университет, Москва, Россия

⁴Phoenix Geophysics Ltd, Toronto, Canada

Поступила 19 января 2012 г.

Представлено членом редколлегии В.Н. Шуманом

Наведено стислий огляд раніше виконаних робіт з наголосом на результати польових спостережень. За допомогою плівкового моделювання оцінено вплив *S*-ефекту на криві магнітотелуричного зондування (МТЗ). Зіставлення результатів моделювання з натурними кривими МТЗ показало, що електричний опір верхньої частини консолідованої кори, що підстеляє осадові відклади на Українському щиті, у регіональному плані значно нижчий, ніж очікувалося. За польовими даними, Кировоградська аномалія електропровідності продовжується під Чорним морем.

Brief review of the earlier studies of Kirovograd electrical conductivity anomaly with emphasis on the field data is presented. The influence of *S*-effect on the magnetotelluric sounding (MTS) curves in the Ukrainian Shield was estimated by thin film modeling. Comparison of the modeling results with MTS field data shows that resistivity of upper part of consolidated crust underlying sediments in the Ukrainian Shield is regionally much lower than expected. Our recent field data have been presented showing that the Kirovograd electrical conductivity anomaly continues under the Black Sea.

Кировоградская аномалия была обнаружена в 1967 г. [Рокитянский и др., 1968] и в последующие 20 лет изучалась методом МВП (аналоговые трехкомпонентные станции системы Боброва) и МТЗ (цифровые лаборатории ЦЭС-2). Данные МВП — векторы индукции и профильные кривые восточной компоненты горизонтального переменного магнитного поля, показывают наличие в первом приближении двумерной региональной аномалии с генеральным простиранием север—юг [Рокитянский, 1975] (рис. 1). Данные МТЗ, проведенных Центральной геофизической экспедицией

(г. Днепропетровск) под руководством А.И. Ингерова, интерпретируются значительно сложнее. Их главная задача — определение глубины до верхней кромки аномального тела, выполненное со значительной погрешностью в силу влияния приповерхностных неоднородностей Украинского щита, а на его склонах — вследствие экранирования. Результаты описаны в отчетах [Ингеро и др., 1986, 1990], статьях [Ингеро и др., 1988; Рокитянский, Ингеро, 1989; Соллогуб и др., 1988] и обобщены в монографиях [Рокитянский, 1975; Дьяконова и др., 1986].

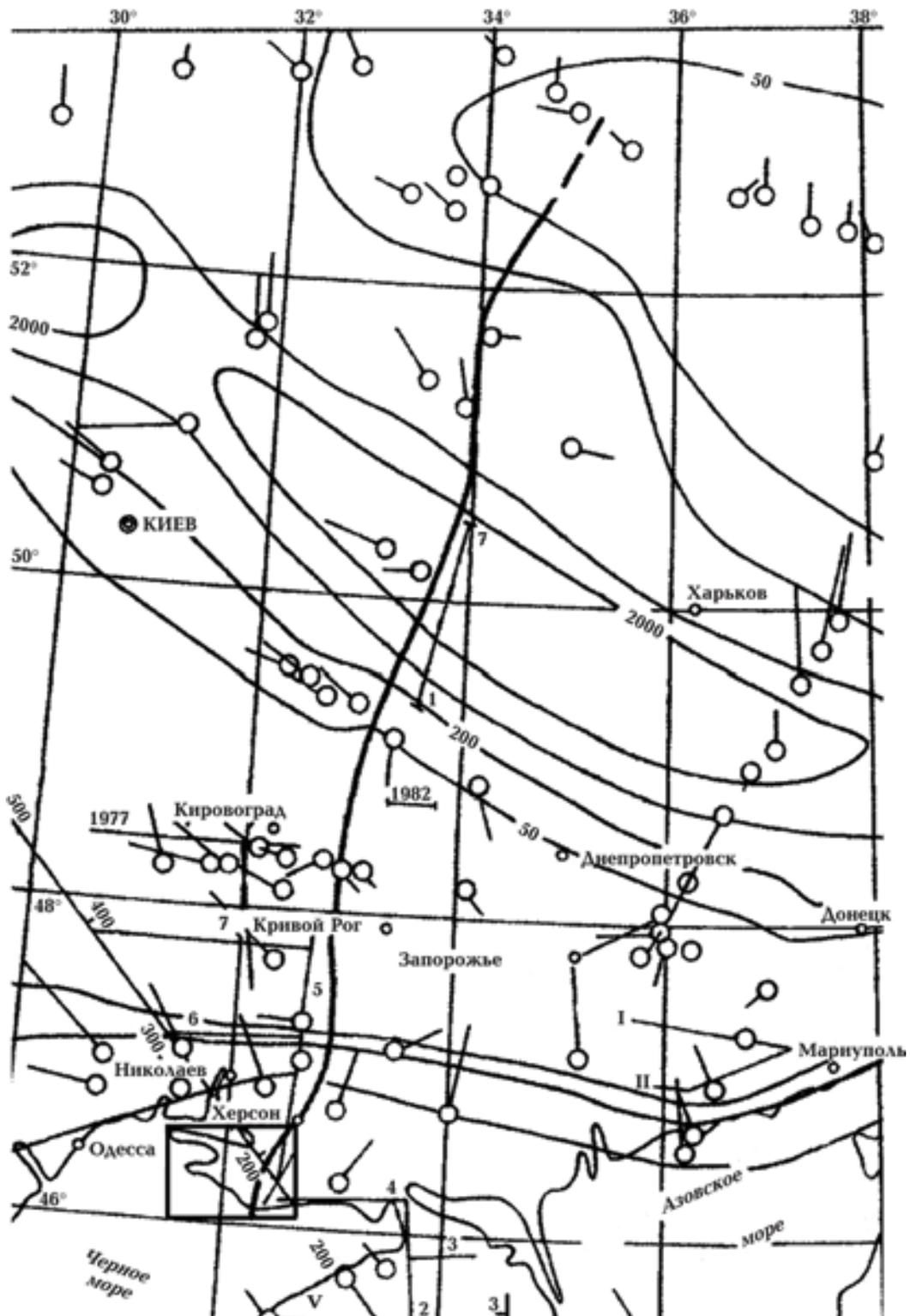


Рис. 1. Кировоградская аномалия (жирная линия), изолинии S осадочного чехла (в сантиметрах) — тонкие линии; прямые линии — профили МТЗ; кружочки — пункты МВП, векторы Визе даны в них для интервала периодов 15—60 мин [Дьяконова и др., 2005].

В последние 30 лет моделирование Кировоградской аномалии (в основном решение прямых задач) проводилось с использованием двумерных, пленочных и трехмерных программ [Баглаенко и др., 1996; Бурахович, Кулик, 2007; Логвинов, Тарасов, 2005; Ковачикова и др., 2005]. Моделировались поля для весьма сложных моделей, которые сопоставлялись, по существу, только с измеренными со значительной погрешностью векторами индукции. Сопоставление же с данными МТЗ давало недопустимо большие невязки. Поэтому многочисленные детали рассчитанных и опубликованных моделей не подкреплены достаточно информативными данными наблюдений.

Поскольку результаты наблюдений приведены в разрозненных публикациях, считаем

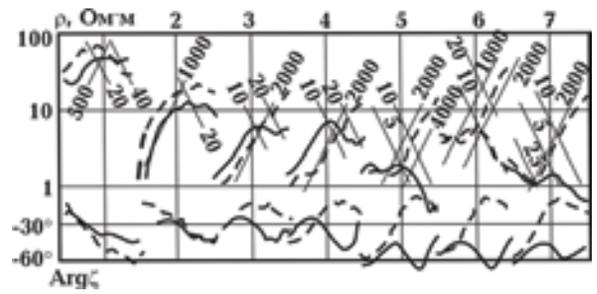


Рис. 2. Кривые МТЗ (пункты 1—7) вдоль профиля вкрест простирания Днепровско-Донецкой впадины в нескольких километрах восточнее оси Кировоградской аномалии. Сплошные линии — ρ_{xy} , штриховые — ρ_{yx} ; ось x ориентирована в направлении СВ 20° перпендикулярно к оси впадины [Рокитянский, Харченко, 1978].

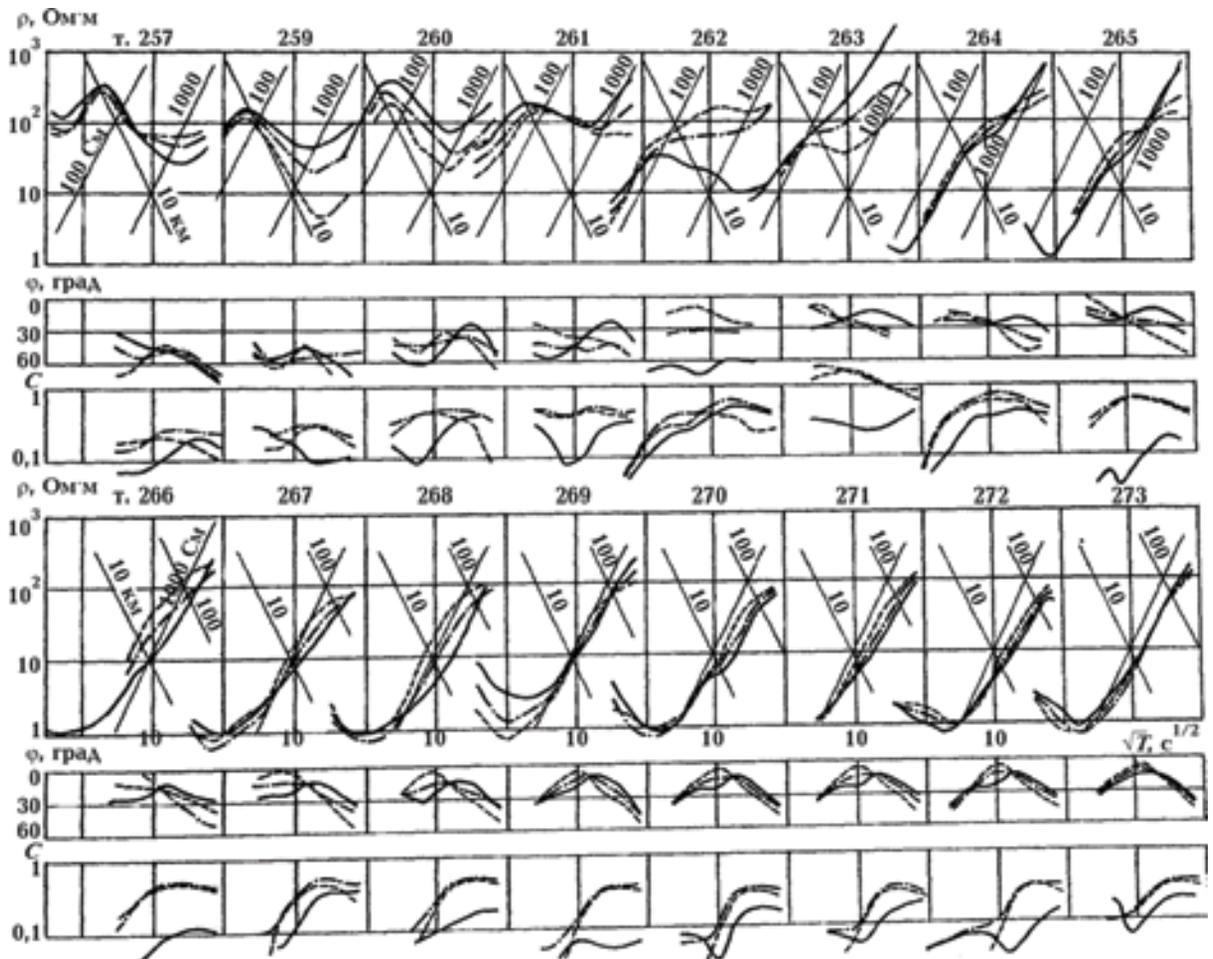


Рис. 3. Кривые МТЗ вдоль профиля 5 на рис. 1 (пункт 257 на северном конце профиля, пункт 265 — на южном), вдоль оси Кировоградской аномалии, от центра Украинского щита до Черного моря [Дьяконова и др., 1986]: ρ_{xy} , ϕ_{xy} — сплошные линии, ρ_{yx} , ϕ_{yx} — штриховые; ось x направлена на север; эффективные кривые и $C = (C_x^2 + C_y^2)^{1/2}$ — штрихпунктирные линии.

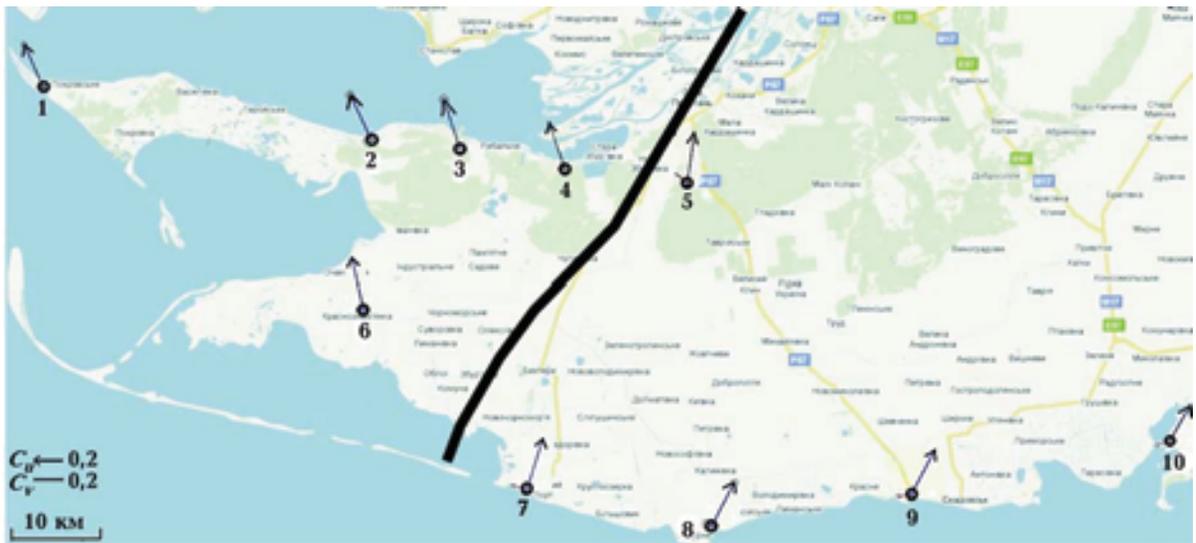


Рис. 4. Точки новых наблюдений МТЗ в 2008—2009 гг. (результаты представлены на рис. 5).

целесообразным обсудить их в данной работе, что проиллюстрирует сложность геоэлектрической обстановки в различных частях аномалии и покажет проблемы, возникающие при интерпретации. Представлены также данные наших новых наблюдений 2008—2009 гг. в южной части континентальной Украины.

Район Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ). Рассмотрим рис. 2. На продольных относительно простирания Кировоградской аномалии кривых ρ_{xy} (сплошные линии), в пределах ДДВ видны протяженные нисходящие ветви, "отбивающие" глубину h верхней кромки Кировоградской аномалии, которая получилась равной 13, 14, 6, 11 и 6 км по данным пунктов 3—7. Наблюдается обратная корреляция с продольной проводимостью верхнего слоя, т. е. "S-эффект", поэтому изменчивости глубины, полученной путем формальной интерпретации, не следует придавать значение, можно говорить только о среднем результате $h \approx 10$ км. Нисходящие кривые ρ_{xy} вместе с φ_{xy} дают оценку суммарной продольной проводимости Кировоградской аномалии $S_{MTZ} > 10^4$ См. По данным МВП весьма надежно установлена интегральная продольная проводимость G Кировоградской аномалии: $G = 2 \cdot 10^8$ См · м. Сопоставив значения проводимости, полученные по МТЗ и МВП и используя методику, предложенную в работе [Рокитянский, 1975, с. 116—122], имеем результат: оценка МТЗ завышена в 2,4 раза. Причиной, очевидно, является региональный (в пределах всей структуры ДДВ) S-эффект, ко-

торый приводит к дополнительному понижению поперечной относительно простирания ДДВ кривой ρ_{xy} . S-эффект установлен еще в 1960-е годы пионерными работами М. Н. Бердичевского и Г. А. Чернявского в северо-западной части впадины [Бердичевский и др., 1970]. С учетом и этой поправки можно оценить глубину залегания Кировоградской аномалии под ДДВ: $h = 20 \pm 10$ км. Оценка погрешности, возможно, слегка завышена, но для ее существенного уменьшения потребуются новые наблюдения и объемное моделирование.

Украинский щит и его южный склон.

На рис. 3 представлены данные обработки 16 пунктов МТЗ вдоль меридионального профиля над осью Кировоградской аномалии. Над узкими аномалиями (Карпатская, Приильменская) поперечная кривая может "не чувствовать" аномалию, а продольная давать полезный результат. На первых четырех пунктах в пределах щита кривые не расходились и их нисходящие участки "отбили" глубины 15, 10, 15, 15 км. Продольная проводимость верхнего слоя составила 8—15 См, в северном и южном направлениях увеличивалась. Таким образом, меридиональные кривые ρ_{xy} должны быть завышены S-эффектом и полученные по ним глубины будут завышены, что и наблюдается в пунктах 259 и 260. При протекании тока в направлении с запада на восток продольная проводимость S_1 осадочного слоя в районе этих пунктов максимальна, следовательно S-эффект приведет к занижению кривых ρ_{yx} и занижению полученных по ним глу-

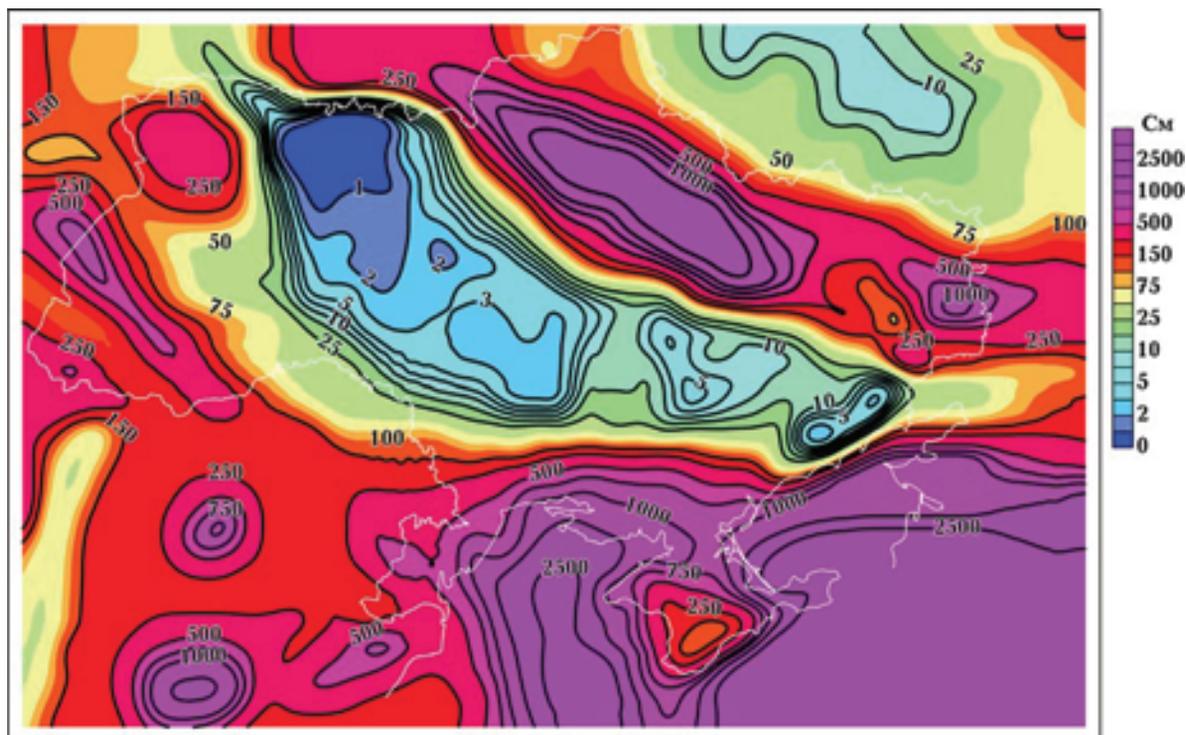


Рис. 6. Карта суммарной продольной проводимости S (в сименсах) осадочных отложений Украины и прилегающих территорий.

бин. Резюмируя изложенное, можно полагать, что наиболее вероятная глубина залегания верхней кромки Кировоградской аномалии в районе пунктов 257—261 равна 15 ± 8 км в предположении ее постоянства под всеми пунктами. Возможные различия глубины могут быть изучены при наличии более детальных данных.

Следующие два пункта 262—263 находятся в начале склона к Причерноморской впадине, S осадков увеличивается до 50 и 80 См, кривые сложным образом расходятся и "отбивают" глубины порядка 2—8 км. Далее на юг все 10 пунктов МТЗ имеют восходящую ветвь, в отдельных из них — с перегибом, но по этим данным нельзя сделать вывод о наличии хорошо проводящей аномалии, которая с полной достоверностью установлена методом МВП. Таково действие эффекта экранирования [Бердичевский и др., 1970].

Новые исследования. В 2005—2010 гг. вышла в свет серия из четырех монографий "Геолого-геофизическая модель шовных зон Украинского щита". К Кировоградской аномалии примыкает Криворожско-Кременчугская шовная зона на востоке и Голованевская — на западе. В работе [Азаров и др., 2006] представле-

на переинтерпретация старых данных А. И. Ингерова, а также выполнены наблюдения вдоль двух новых профилей в северной части Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита, для которых представлены псевдоразрезы эффективного кажущегося сопротивления в диапазоне периодов 1—300 с и дан результат одномерной интерпретации удельного сопротивления в диапазоне глубин 0—60 км. Об анализе и учете искажений от приповерхностных неоднородностей и разломных зон авторы не пишут.

В монографии [Анциферов и др., 2008] рассмотрены материалы по Голованевской шовной зоне, переинтерпретированы старые данные, а также выполнены два новых коротких детальных профиля "Первомайский" и "Уманский". Представлены три псевдоразреза: поперечные, продольные и эффективные для интервала периодов до 2000 с и соответственно для каждого профиля — по три геоэлектрических разреза до глубины 50 км. Авторы монографии отмечают, что различия результатов по разным компонентам незначительны, и не анализируют эти различия. Между тем на приведенных псевдоразрезах и геоэлектрических моделях различия явно видны. Та-

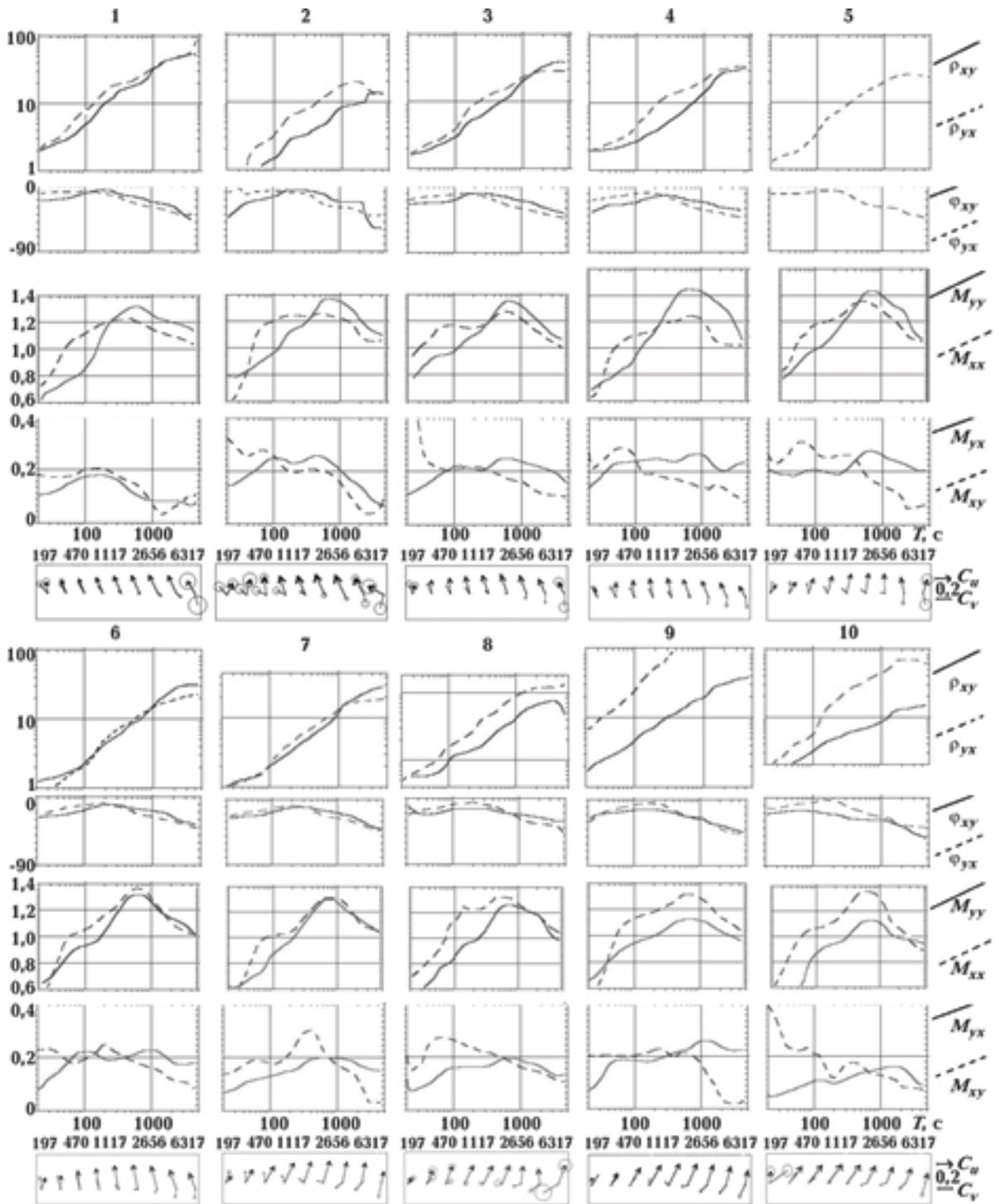


Рис. 5. Результаты обработки данных 2008—2009 гг. Сверху вниз: кажущееся сопротивление ρ_{xy} , ρ_{yx} ; фаза импеданса φ_{xy} , φ_{yx} ; компоненты тензора горизонтального аномального поля: главные компоненты M_{yy} , M_{xx} , ниже — дополнительные M_{yx} , M_{xy} ; в самом низу — векторы индукции для 9 периодов; ось x направлена на север, ось y — на восток. Первые компоненты во всех парах соответствуют поляризации электрического поля на север — сплошные линии, вторые компоненты (восточная поляризация электрического поля) — штриховые.

ким образом, для уточнения геоэлектрической модели необходим учет искажений от приповерхностных неоднородностей. К сожалению, первичные материалы и кривые МТЗ не опубликованы и нам недоступны. Однако некоторые уточнения моделей можно сделать по данным псевдоразрезов, а старые данные А. И. Ингерова могут быть проинтерпретированы по сохранившимся кривым кажущегося сопротивления и фазы в двух направлениях и эффективным кривым.

Наши последние работы на Причерноморском участке. Некоторые исследователи полагали, что Кировоградская аномалия заканчивается, не достигая Черного моря [Белявский, Кулик, 1998; Бурахович, Кулик, 2007]. В 2008—2009 гг. мы выполнили наблюдения вдоль его побережья (рис. 4) и показали, что аномалия не заканчивается, а продолжается и под морем. Результаты обработки по программе И. М. Варенцова представлены на рис. 5. Кривые МТЗ соответствуют кривым, полу-

ченным в указанном районе в 1970—1980 гг., т. е. старым кривым, полученным цифровой аппаратурой, можно доверять. В основе постановки этих работ лежали магнитовариационные данные. И действительно, векторы индукции, как и обычно, четко трассируют ось аномалии (см. рис. 4). Восточная компонента горизонтального аномального поля имеет пологий максимум над осью и убывает в восточном направлении (полуширина 40 км), в западном направлении убывание более медленное. Интерпретация полученных данных будет освещена в отдельной работе.

Пленочное моделирование. Пленочное моделирование выполнено по программе А. С. Дебабова, адаптированной Н. С. Голубцовой для расчетов в ВЦ МГУ [Golubtsova et al., 1988]. Карта интегральной проводимости осадочных отложений (рис. 6), используемая при пленочном моделировании, составлена В. И. Трегубенко и А. И. Ингеровым по результатам площадных съемок методами ВЭЗ, ЧЭЗ, ЗС и

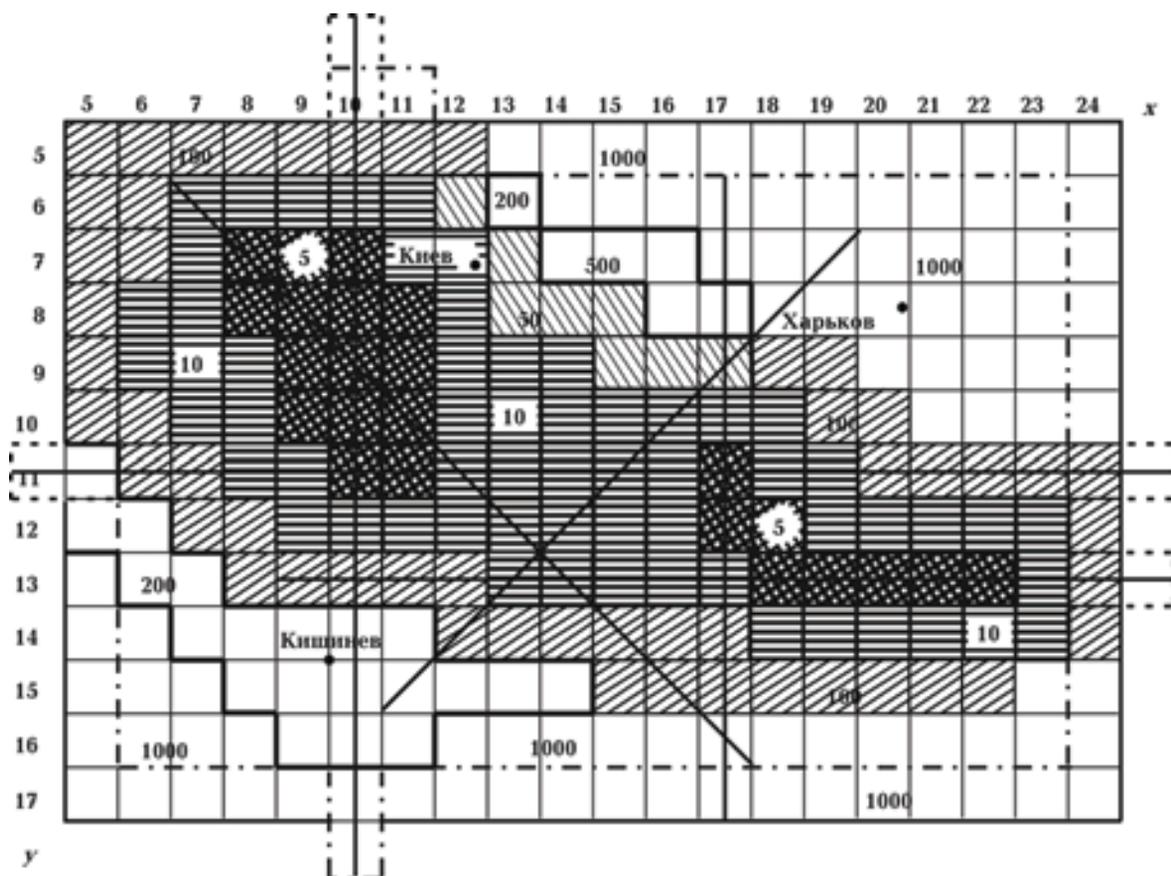


Рис. 7. Сеточная модель суммарной продольной проводимости S осадочных отложений Украинского щита и его склонов.

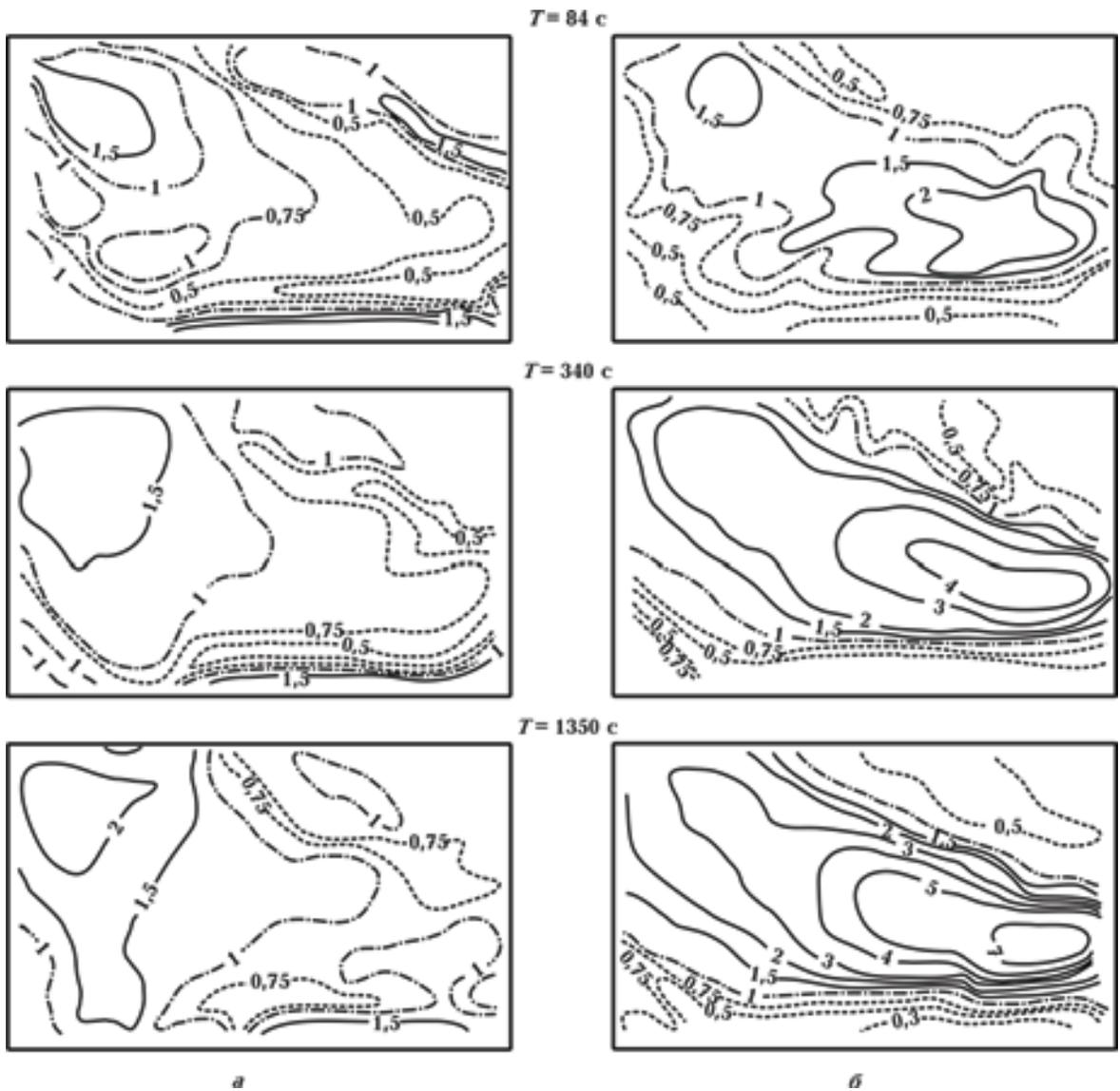


Рис. 8. Карты рассчитанных искажений за счет S -эффекта кривых кажущегося сопротивления на Украинском щите и его склонах: a — широтных кривых $\rho_{yx}/\rho_{\text{норм}}$; $б$ — меридиональных кривых $\rho_{xy}/\rho_{\text{норм}}$, где $\rho_{\text{норм}}$ — локальная одномерная кривая.

МТЗ, выполненных на территории Украины в масштабах 1 : 50 000—1 : 2 500 000. В пределах Украинского щита и его склонов результаты усреднены для окон размером 25 × 25 км. При построении карты также использованы литературные источники [Максимов, Груздев, 1990; Жданов и др., 1987; Кондрашева, 1981; Кравченко, Сапужак, 1989]. По карте проводимости территории Украины (см. рис. 6) построена сеточная модель с ячейками 50 × 50 км общим размером 40 ячеек — с запада на восток и 25 ячеек — с юга на север. После пробных расчетов для обеспечения баланса затрат

машинного времени и точности модель была уменьшена до размера 20 × 13 ячеек (рис. 7), что обеспечивало моделирование эффектов на Украинском щите и смежных структурах. Программа требует, чтобы изучаемая территория с неоднородным распределением $S_1(x, y)$ была окружена горизонтально-слоистой Землей с постоянным распределением проводимости: $S_1 = S_{10}$. Мы выбрали $S_{10} = 1000$ См. Основной задачей моделирования был расчет искажений кажущегося сопротивления ρ_{xy} , ρ_{yx} , вносимых неоднородным распределением S_1 . Для поперечных к изолиниям S_1 кривых искажения

будут тем сильнее, чем больше сопротивление второго слоя ρ_2 под осадками. В расчетах ρ_2 было выбрано равным 1000 и 2500 Ом · м, поскольку коренные породы под осадочным слоем в среднем имеют такие и более высокие сопротивления. Во втором случае искажения были примерно вдвое больше, чем в первом. Однако и в первом случае при $\rho_2 = 1000$ Ом · м расхождения кривых ρ_{xy} и ρ_{yx} были значительно больше (рис. 8), чем наблюдаемые в природе [Дьяконова и др., 1986; Ингеров и др., 1986; 1988; 1990; Ingerov et al., 1999] (см. рис. 3). Отсюда можно сделать вывод о том, что в региональном плане земная кора имеет значительно меньшее сопротивление, по-видимому, за счет разломов и локальных проводящих зон различного масштаба и генезиса.

При расчетах использовался нормальный разрез:

Δh , км	ρ , Ом · м
0—100	1000, 2500
100—120	14, 40, 250
120—500	200
500—800	10
> 800	1

Список литературы

- Азаров Н. Я., Анциферов А. В., Шеремет Е. М., Глевасский Е. Б., Есипчук К. Е., Кулик С. Н., Бурахович Т. К., Пигулевский П. И., Николаев Ю. И., Николаев И. Ю., Сетая Л. Д., Захаров В. В., Курлов Н. К. Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 2006. — 196 с.
- Анциферов А. В., Шеремет Е. М., Глевасский Е. Б., Кулик С. Н., Есипчук К. Е., Пигулевский П. И., Кривдик С. Г., Бурахович Т. К., Анциферов В. А., Сетая Л. Д., Николаев Ю. И., Николаев И. Ю., Цымбал С. Н., Клочков В. М., Шварц Г. А., Безвинный В. П., Гаценко В. А. Геолого-геофизическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 2008. — 305 с.
- Баглаенко Н. В., Варенцов И. М., Гордиенко В. В., Жганов М. С., Кулик С. Н., Логвинов И. М. Геоэлектрическая модель Кировоградской аномалии по геомагнитным данным // Физика Земли. — 1996. — № 4. — С. 87—98.
- Белявский В. В., Кулик С. Н. Геоэлектрическая модель тектоносферы Евразийского складчатого пояса и сопредельных территорий. — Киев: Знання, 1998. — 264 с.
- Бердичевский М. Н., Завадская Т. Н., Чернявский Г. А. Магнитотеллурическое зондирование в вытянутых впадинах // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1970. — № 12. — С. 76—80.
- Бурахович Т. К., Кулик С. Н. Трехмерная модель Кировоградской аномалии электропроводности // Геофиз. журн. — 2007. — 29, № 1. — С. 45—55.
- Дьяконова А. Г., Ингеров А. И., Рокитянский И. И. Электромагнитные зондирования на Восточно-Европейской платформе и Урале. — Киев: Наук. думка, 1986. — 140 с.
- Жганов М. С., Зингер Б. Ш., Файнберг Э. Б., Гогнева Г. С., Санин С. И. Моделирование электромагнитных полей в Карпатско-Паннонском регионе // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1987. — № 1. — С. 71—78.

- Ингеров А.И.* Результаты региональных исследований МТЗ вдоль геотраверсов Ужгород — Ворошиловград и Арташат — Ахалцихе с целью изучения глубинного строения земной коры. — Днепропетровск, 1990. — 309 с.
- Ингеров А.И., Бугримов Л.П., Рокитянский И.И., Ромашкина А.И.* Отчет об исследованиях МТЗ по изучению геоэлектрического разреза земной коры по геотраверсу VIII Килия — Кривой Рог — Харьков за 1984—1985 гг. — Днепропетровск, 1986. — 264 с.
- Ингеров А.И., Бугримов Л.П., Колдунов А.А., Попов В.М., Рокитянский И.И., Дзюба К.И., Лысенко Е.С., Рокитянская Д.А.* Результаты МТЗ на участке Килия — Кривой Рог — Харьков // Литосфера Центральной и Восточной Европы: Геотраверсы IV, VI, VIII. — Киев: Наук. думка, 1988. — С. 145—150.
- Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.Н.* Кировоградская аномалия // Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Корвін пресс, 2005. — С. 39—51.
- Кондрашева Н.В.* Продольная проводимость осадочного чехла и водной оболочки акватории Черного и Азовского морей // Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акваториях морей и океанов электромагнитными методами. (Всесоюз. семинар, г. Звенигород, 1981). — Москва: АН СССР, 1981. — С. 138—146.
- Кравченко А.П., Сапужак Я.С.* Геоэлектрическая характеристика осадочного чехла Карпатского региона // Геофиз. журн. — 1989. — **11**, № 5. — С. 43—53.
- Логвинов И.М., Тарасов В.Н.* Геоэлектрическая 2D-модель Кировоградской аномалии электропроводности // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 5. — С. 754—769.
- Максимов В.М., Груздев В.Н.* Электропроводность земной коры территории ВКМ и сопряженных структур // Глубинные геоэлектрические исследования с использованием промышленных линий электропередач. — Апатиты, 1990. — С. 35—38.
- Рокитянский И.И.* Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. — Киев: Наук. думка, 1975. — 279 с.
- Рокитянский И.И., Ингеров А.И.* Глубинные электромагнитные исследования на Украине. — Киев, 1989. — 78 с. — Деп. в ВИНТИ 31.10.89, № 6582-В89.
- Рокитянский И.И., Логвинов И.М., Лугинина Н.А.* Магнитовариационное профилирование на Украинском щите // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1968. — № 3. — С. 100—106.
- Рокитянский И.И., Харченко С.П.* Опыт магнитотеллурического зондирования на пересечении Кировоградской аномалии с Днепроовско-Донецкой впадиной // Геофиз. сб. АН УССР. — 1978. — **86**. — С. 61—67.
- Сологуб В.Б., Чекунов А.В., Кутас Р.И., Ильченко Т.В., Сологуб Н.В., Бородулин М.А., Пашкевич И.К., Рокитянский И.И., Красовский С.С., Трипольский А.А., Калюжная Л.Т.* Строение литосферы по линии Вранча — Воронежский кристаллический массив // Литосфера Центральной и Восточной Европы. — Киев: Наук. думка, 1988. — С. 154—161.
- Golubtsova N.S., Ingerov A.I., Rokityansky I.I., Rokityanskaya D.A.* Influence of the inhomogeneity of the total longitudinal conductivity of the sedimentary cover on the deep MTS of the Ukrainian Shield (USh) // Ninth Workshop on electromagnetic induction in the Earth and Moon. Dagomys complex, Sochi, USSR, 24—31 Oct., 1988. — P. 81.
- Ingerov A.I., Rokityansky I.I., Tregubenko V.I.* Forty years of MTS studies in the Ukraine // Earth Planets Space. — 1999. — **51**. — P. 1127—1133.