

УДК 550.837.211

**Д.А. Бойченко<sup>(1)</sup>****П.Ю. Пушкарёв<sup>(1)</sup>** (к.ф.-м.н., доцент), [pavel\\_pushkarev@list.ru](mailto:pavel_pushkarev@list.ru)**Е.Д. Александрова<sup>(2)</sup>****И.М. Варенцов<sup>(3)</sup>** (к.ф.-м.н.)**В.А. Куликов<sup>(1,2)</sup>** (к.ф.-м.н., доцент)**И.Н. Лозовский<sup>(3)</sup>****Рабочая группа KIROVOGRAD**<sup>(1)</sup> Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова<sup>(2)</sup> ООО «Северо-Запад»<sup>(3)</sup> ЦГЭМИ ИФЗ РАН

## **ОДНОМЕРНАЯ И ДВУМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ЗАПАДНОМ СКЛОНЕ ВОРОНЕЖСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ**

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование, коровая электропроводность, Воронежская антеклиза

**D.A. Boychenko<sup>(1)</sup>****P.Yu. Pushkarev<sup>(1)</sup>****E.D. Aleksanova<sup>(2)</sup>****I.M. Varentsov<sup>(3)</sup>****V.A. Kulikov<sup>(1,2)</sup>****I.N. Lozovsky<sup>(3)</sup>****Workgroup KIROVOGRAD**<sup>(1)</sup> Faculty of Geology of MSU<sup>(2)</sup> «Nord-West» Ltd.<sup>(3)</sup> GEMRC IPE RAS

## **ONE-DIMENSIONAL AND TWO-DIMENSIONAL INVERSION OF MAGNETOTELLURIC DATA, OBTAINED ON THE WESTERN SLOPE OF THE VORONEZH ANTECLISE**

### **Аннотация**

*В рамках проекта KIROVOGRAD на территории России и Украины, в пределах западного склона Воронежской антеклизы и южнее, выполнены магнитотеллурические зондирования по субширотным профилям. Целью исследований было прослеживание вероятного северного продолжения Кировоградской коровой проводящей аномалии, известной на Украинском щите. Однако уже предварительный анализ результатов зондирований показал наличие сложной системы коровых аномалий. Настоящая статья посвящена сглаживающей инверсии магнитотеллурических данных, полученных на российской территории к началу 2012-го года. Рассмотрены результаты совместной 2D*

инверсии поперечного импеданса, продольного импеданса и типпера, примеры 2D инверсии отдельных компонент, а также 1D инверсии эффективного импеданса. Выполнено сравнение с результатами, полученными с использованием других программ и подходов. Оценена структура коровых аномалий, сделаны предположения об их природе.

### Abstract

*In the framework of the KIROVOGRAD project magnetotelluric soundings were performed along latitudinal profiles on the territories of Russia and Ukraine, within the western slope of the Voronezh anteklise. The aim of the studies was the delineation of the northern elongation of the Kirovograd crustal conductive anomaly, known within the Ukrainian shield. However, preliminary analysis of the sounding results showed the presence of a complex system of crustal anomalies. This paper is dedicated to smoothed-structure inversion of magnetotelluric data, obtained on the Russian territory until the beginning of the year 2012. Results of parallel 2D inversion of transverse impedance, longitudinal impedance and tipper are considered, examples of partial inversions of data components are presented, as well as 1D determinant impedance inversion results. Comparison with the results, obtained using other software and approaches, was performed. The structure of crustal anomalies was evaluated, prognosis of their nature was performed.*

### Введение

Воронежская антеклиза характеризуется малой мощностью и электрической проводимостью осадочного чехла, что создаёт благоприятные условия для изучения аномалий электропроводности в консолидированной земной коре (в кристаллическом фундаменте). В то же время глубинная геоэлектрическая изученность Воронежской антеклизы существенно меньше, чем Балтийского и Украинского щитов. Мы будем рассматривать часть Воронежской антеклизы, расположенную к западу от железной дороги Москва-Харьков, являющейся источником сильных электромагнитных помех.

Аномальная проводимость земной коры была замечена в ходе практик студентов геологического факультета МГУ, проводимых в регионе с 1992-го года [Александрова и др., 2005]. На рубеже 1990-х и 2000-х годов в районе с. Барятино силами преподавателей и студентов МГУ и РГГРУ выполнялись комплексные исследования кристаллического фундамента, включая магнитотеллурические (МТ) зондирования [Александрова и др., 2010].

В 2007-м году начался качественно новый этап МТ исследований региона. Благодаря инициативе Ив.М. Варенцова, помимо Геологического факультета МГУ и ООО «Северо-Запад», в работе принял участие Центр геоэлектромагнитных исследований

Института физики Земли РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН). Исследования ведутся в сотрудничестве с Институтом геофизики НАНУ (И.М. Логвинов и другие) в рамках международного проекта KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2012].

В ходе проекта на территории  $49-55^{\circ}$  с.ш. и  $30-37^{\circ}$  в.д. выполнены МТ зондирования с аппаратурой MTU-5 канадской фирмы «Phoenix Geophysics». В ряде точек также проводились измерения с аппаратурой LEMI (Львовский центр ИКИ НАНУ и НКАУ), но в настоящей статье они не использовались. На российской территории МТ зондирования в объеме 76 точек (на начало 2012 года) были выполнены по 6 профилям: «Киров», «Жиздра», «Навля», «Суземка», «Шостка», «Обоянь» (рис.1).

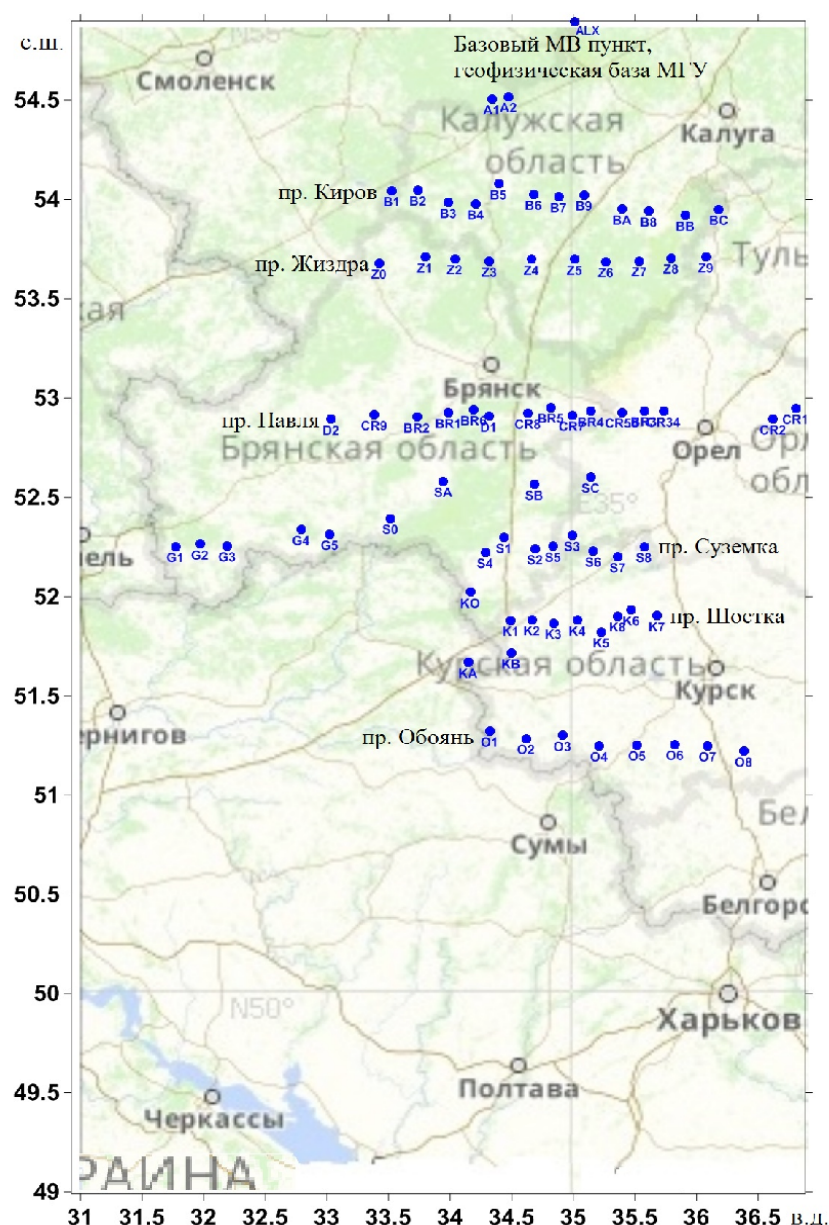


Рисунок 1. Схема расположения точек наблюдения.

Измерительная станция MTU-5 позволяет измерять пять компонент электромагнитного (ЭМ) поля (горизонтальные электрические –  $E_x$  и  $E_y$ , горизонтальные магнитные –  $H_x$  и  $H_y$ , а также вертикальную магнитную –  $H_z$ ). Регистрация ЭМ полей велась синхронно в полевых точках и на базовом пункте, в качестве которого использовалась геофизическая база МГУ в д. Александровка (ALX). Расстояния между точками вдоль профилей составляли 10-20 км, расстояние между профилями 20-50 км. Наблюдения в полевых точках продолжались 2-3 суток, частота дискретизации в режиме непрерывной записи составляла 15 Гц. Обработка МТ данных проводилась с помощью стандартного программного обеспечения SSMT2000, поставляемого вместе с аппаратурой «Phoenix Geophysics». Для получения гладких частотных зависимостей компонент МТ данных применялась программа MT-Corrector (ООО «Северо-Запад»).

### Методика одномерной и двумерной инверсии

Прежде всего, был выполнен анализ МТ данных: карт параметров неоднородности и асимметрии среды, полярных диаграмм и индукционных стрелок. Их построение осуществлялось с помощью программы MT-Array [Иванов, 2010]. Одномерное (1D) приближение оказалось применимым лишь на высоких частотах, отвечающих осадочному чехлу. Кроме того, можно ожидать, что в точках, расположенных над проводящими коровыми аномалиями, 1D инверсия позволит достоверно определить глубины до их кровли. Двумерное (2D) приближение, судя по результатам анализа, лучше описывает реальную ситуацию, особенно в северной части изучаемого района.

Одномерная инверсия выполнялась по программе Occam\_1D [Constable et al., 1987]. Программа позволяет получить в каждой точке МТ зондирования гладкую зависимость сопротивления от глубины, согласующуюся с кривой кажущегося сопротивления и кривой фазы импеданса. Мы проводили инверсию эффективного импеданса  $Z_{ef}$ . Сетка глубин для всех точек была одинаковой и составляла 7 точек на декаду в диапазоне от 10 м до 140 км. При построении геоэлектрических разрезов осуществлялась линейная интерполяция логарифмов сопротивления между точками зондирования с помощью программы Surfer компании «Golden Software». Разрезы строились до глубины 30 км, поскольку на больших глубинах 1D приближение едва ли даёт достоверный результат.

Двумерная инверсия проводилась с использованием программы REBOCC [Siripunvaraporn and Egbert, 2000]. Она обеспечивает получение гладких распределений сопротивления в разрезе по значениям поперечного импеданса  $Z_{yx}$ , продольного импеданса  $Z_{xy}$  и типпера  $W_{zy}$  (в декартовой системе координат с осью X, направленной

на север, и осью  $Y$  – на восток). Импедансы могут быть представлены как комбинации их фазы и кажущегося сопротивления, вычисленного по их модулю. Типпер традиционно представляется вещественной и мнимой компонентами. В качестве стартовой модели использовалось однородное полупространство с сопротивлением  $1000 \text{ Ом*м}$ . Вначале инверсия проводилась с использованием стандартных весов фазы импеданса и кажущегося сопротивления, однако при этом на разрезах возникали сомнительные аномалии, скорее всего связанные со статическими смещениями кривых кажущегося сопротивления под влиянием приповерхностных неоднородностей. Тогда мы уменьшили вес кажущегося сопротивления в 10 раз, после чего были получены геоэлектрические разрезы, приведённые ниже. Разрезы построены до глубины 100 км с помощью программы Surfer.

Как известно, в двумерной среде МТ поле распадается на две части: ТЕ-моду и ТМ-моду [Бердичевский и Дмитриев, 2009]. ТЕ мода связана с токами, текущими вдоль структур, а ТМ-мода – с текущими поперёк структур. Представителями ТЕ-моды являются продольный импеданс и типпер, ТМ-моды – поперечный импеданс. Две моды имеют разную чувствительность к приповерхностной и глубинной электропроводности и обеспечивают разную точность двухмерной аппроксимации реальных трехмерных структур. Поэтому мы дополнили геоэлектрические разрезы, построенные при параллельной инверсии всех трёх упомянутых компонент, разрезами, полученными по отдельным компонентам (в статье они приведены для двух профилей). Различия разрезов, построенных по отдельным компонентам, характеризуют надёжность разрезов, построенных по всем компонентам.

### Результаты инверсии

Рассмотрим геоэлектрические разрезы, построенные по результатам инверсии МТ данных, начиная с северного профиля («Киров»).

Но прежде отметим общие особенности всех разрезов. В их верхней части (до 1 км) присутствует проводящий осадочный чехол, ниже залегают консолидированная земная кора и верхняя мантия, фоновые значения сопротивлений которых являются высокими. На этом фоне выделяются проводящие аномалии, представляющие для нас основной интерес. Разрезы по результатам 1D инверсии являются менее гладкими, чем результаты 2D инверсии, поскольку в первом случае не использовалось сглаживание по горизонтали. Кроме того, при 1D инверсии разрез получается сильно изменчивым и по вертикали за

счёт более существенной минимизации невязки из-за ограниченного набора данных (только одна точка зондирования).

На рис. 2 представлены разрезы по профилю «Киров». На разрезе по результатам 1D инверсии аномалия располагается между точками В5 и В8, при этом сопротивления минимальны между точками В5 и В9, а глубина до проводника составляет 15-20 км. Это соответствует результатам, полученным в этом районе при интерпретации более ранних МТ зондирований с использованием 1D подбора параметров толсто-слоистой модели [Александрова и др., 2010]. При 2D инверсии получен более сглаженный образ аномалии. Она также располагается между точками В5 и В8, минимум сопротивления находится под точкой В9, аномальная зона отвечает интервалу глубин примерно от 10 до 60 км.

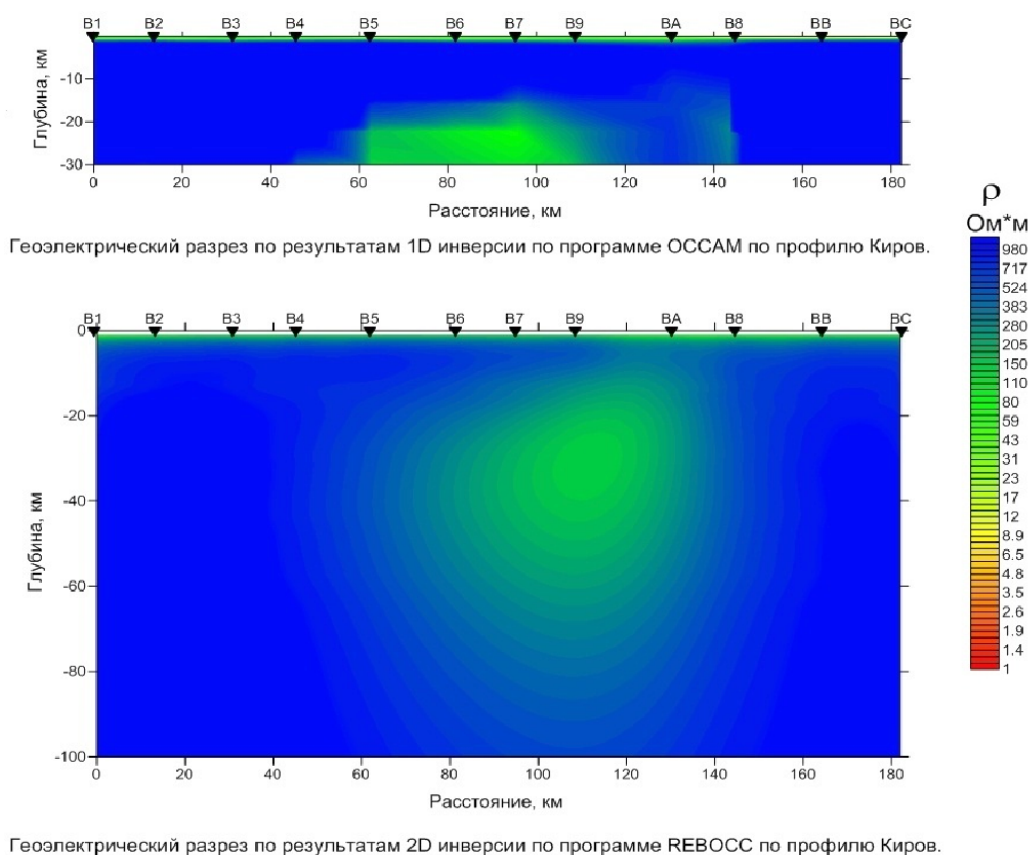


Рисунок 2. Геозлектрические разрезы по профилю «Киров».

Отметим, что при отдельной инверсии  $Z_{yx}$ ,  $Z_{xy}$  и  $W_{zy}$  на этом профиле были получены геозлектрические разрезы с существенными различиями, что, по-видимому, и обуславливает весьма гладкий образ аномалии, полученный при совместной инверсии. Так, по продольному импедансу, которому отвечает наибольшая невязка, коровый проводник плохо виден, но есть небольшие аномалии, которые могут быть связаны с гальваническими искажениями. Поперечный импеданс даёт проводник, распадающийся на левую и правую зоны (соответственно, между точками В4 и В6 и точками В9 и ВА).

Аномалия, полученная по типперу, распадается на три минимума сопротивления. Можно ожидать, что совместная инверсия поперечного импеданса и типпера может в данном случае обеспечить наиболее детальный результат.

Сравним наши разрезы с разрезами, полученными ранее. В работе [Варенцов и др., 2013] приведён результат 2D инверсии МТ данных по профилю «Киров» по программе Ив.М. Варенцова [Варенцов, 2002], см. рисунок 3. Видно, что аномалия находится между точками В4 и В10 (ВА), что хорошо коррелируется с нашим результатом.

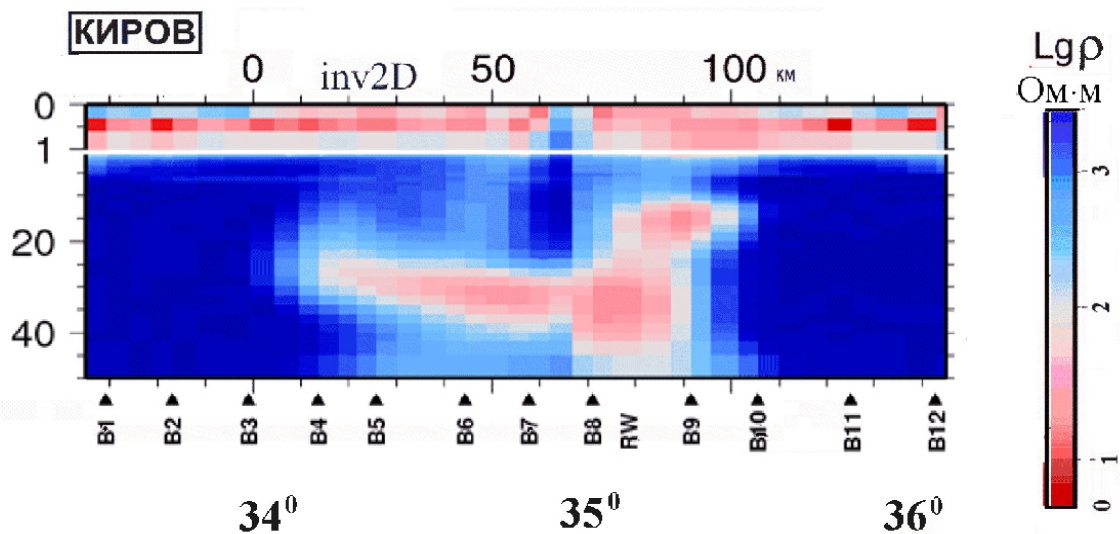


Рисунок 3. Геоэлектрические разрезы по результатам 2D инверсии по программе Ив.М. Варенцова по профилю «Киров».

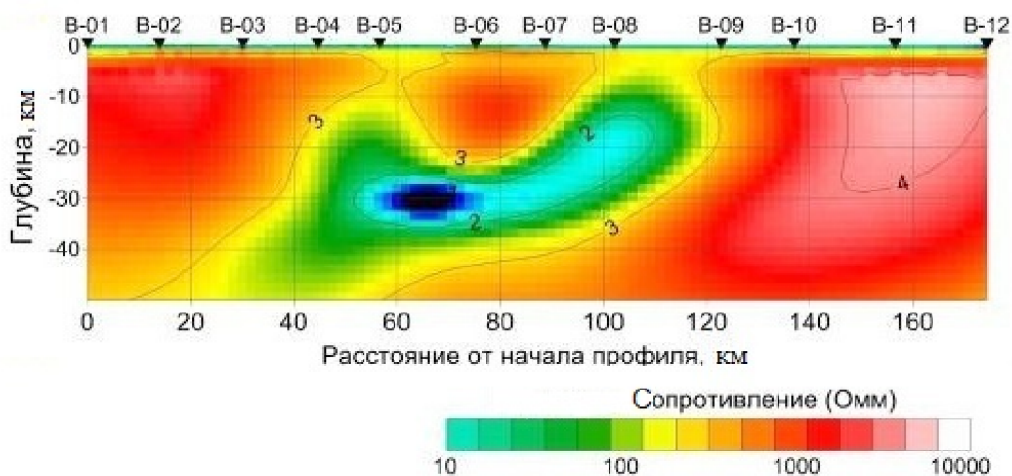


Рисунок 4. Геоэлектрические разрезы по результатам 2D инверсии по программе Р. Мэки по профилю «Киров».

На рисунке 4 представлен разрез по тому же профилю из работы [Александрова и др., 2013], полученный с помощью программы сглаживающей инверсии Р. Мэки [Rodi and Mackie, 2001]. Аномалия отвечает примерно тому же участку профиля, что и у нас.

Наиболее хорошо согласуется положение приподнятых левого и правого краёв аномалий с аномальными зонами, полученными нами при 2D инверсии поперечного импеданса.

На геоэлектрических разрезах, полученных в результате 2D инверсии по профилю Жиздра (рис. 5), область повышенной проводимости по форме представляет собой крупное асимметричное тело. Верхняя кромка аномальной зоны местами залегает на глубинах менее 10 км. Размеры аномалии в широтном направлении 70 км. Аномалия имеет четко выраженные восточный и западный максимумы, которые располагаются между точками Z3-Z4 и Z7-Z8. Исходя из результатов анализа МТ-данных в программе МТ-Array, изгиб и углубление в центре аномалии на профиле Жиздра может быть связано с влиянием приповерхностных неоднородностей. На разрезе по 1D инверсии аномалия проявляется под большинством точек профиля, за исключением краев профиля и точки Z6, глубина до аномалии – порядка 20 км на западе и в центре и 10 км на востоке.

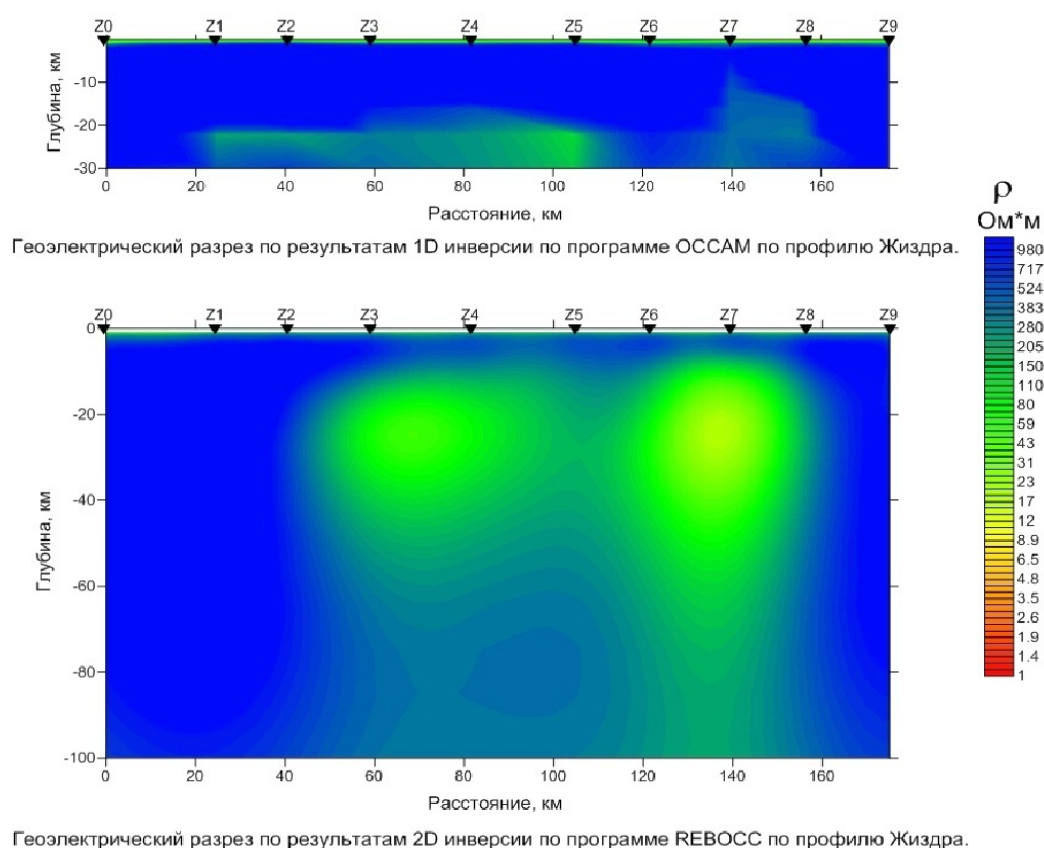


Рисунок 5. Геоэлектрические разрезы по профилю «Жиздра».

Разрезы по профилю Жиздра, полученные в результате инверсий отдельно продольного импеданса, поперечного импеданса и всех компонент имеют следующую общую черту: на разрезах присутствует коровая аномалия проводимости с двумя локальными минимумами сопротивления (Рис. 6). При этом верхняя кромка проводящей



аномалии на разрезе, полученном в результате инверсии всех компонент, имеет ту же глубину залегания (10 км), что и на разрезе, полученном в результате инверсии поперечного импеданса. А глубина нижней кромки равна 50 км и по разрезу для всех компонент, и по разрезу для продольного импеданса. Минимумы сопротивления относятся к восточной части аномалии на разрезах поперечного импеданса и всех компонент. А на разрезе продольного импеданса больше проявлен западный минимум. На разрезе, построенном по результатам инверсии типпера, выделяется лишь восточная аномалия, с центром между точками Z4 и Z7, где на глубинах свыше 10 км сопротивление понижается до 20 Ом\*м.

На рисунке 7 показаны результаты 2D инверсии МТ данных по профилю «Жиздра» по программе Ив.М. Варенцова [Варенцов и др., 2013]), а на рисунке 8 - результаты 2D инверсии МТ данных по профилю «Жиздра» по программе Р. Мэки [Александрова и др., 2013]). На этих разрезах аномалия располагается между точками Z2 и Z9, что согласуется с нашим результатом. Как и на наших разрезах, аномалии на рисунках 8 и 9, имеют два минимума, причем восточный лучше выражен. Главное отличие наших результатов состоит в том, что аномалия имеет глубинные проводящие «корни».

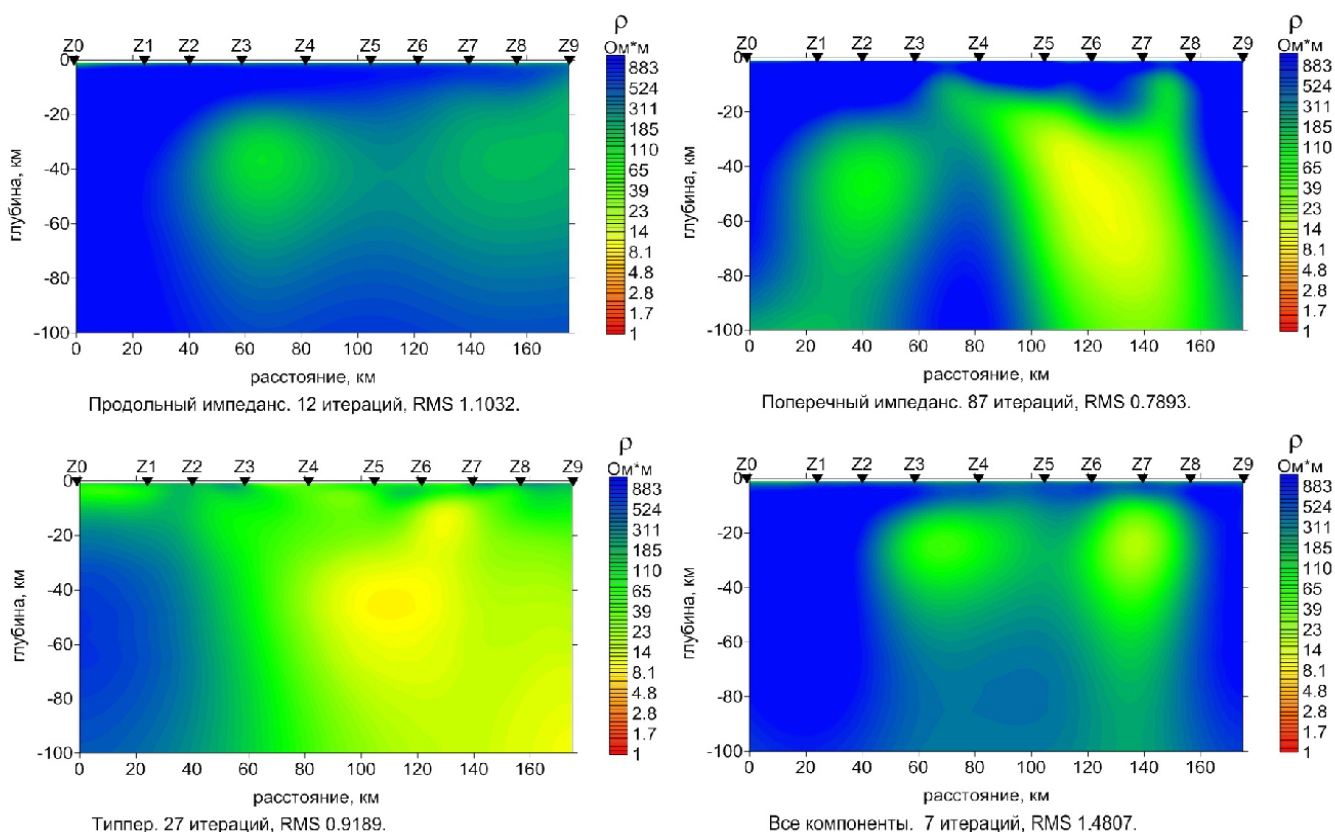


Рисунок 6. Геоэлектрические разрезы по результатам покомпонентной и совместной 2D инверсии по программе REBOSS по профилю «Жиздра».

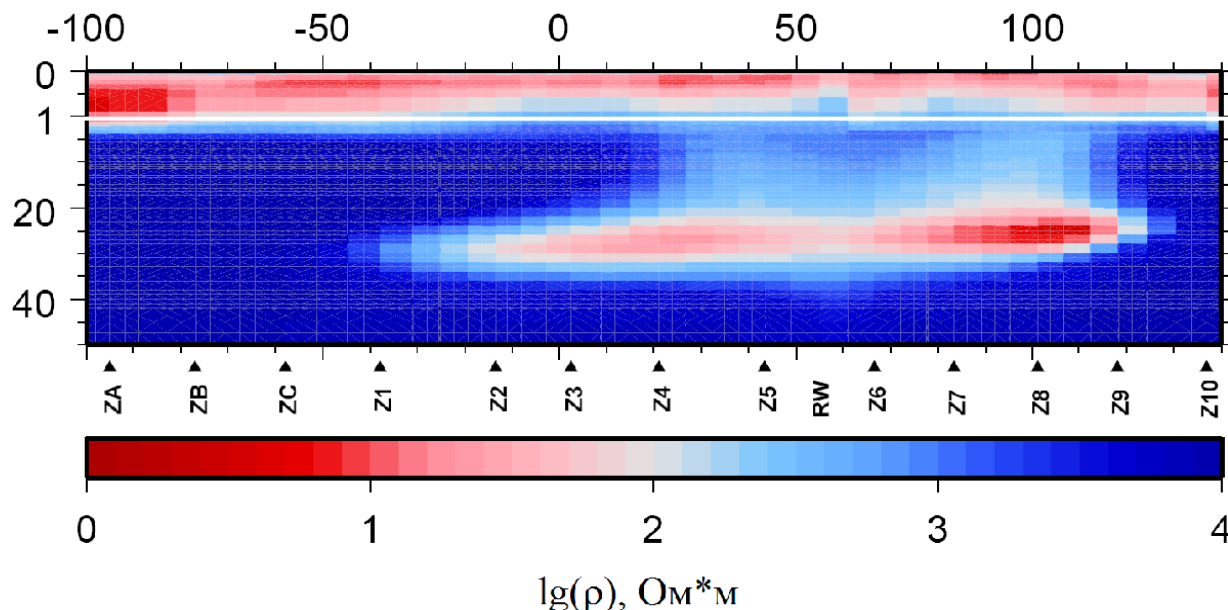


Рисунок 7. Геоэлектрические разрезы по результатам 2D инверсии по программе Ив.М. Варенцова по профилю «Жиздра».

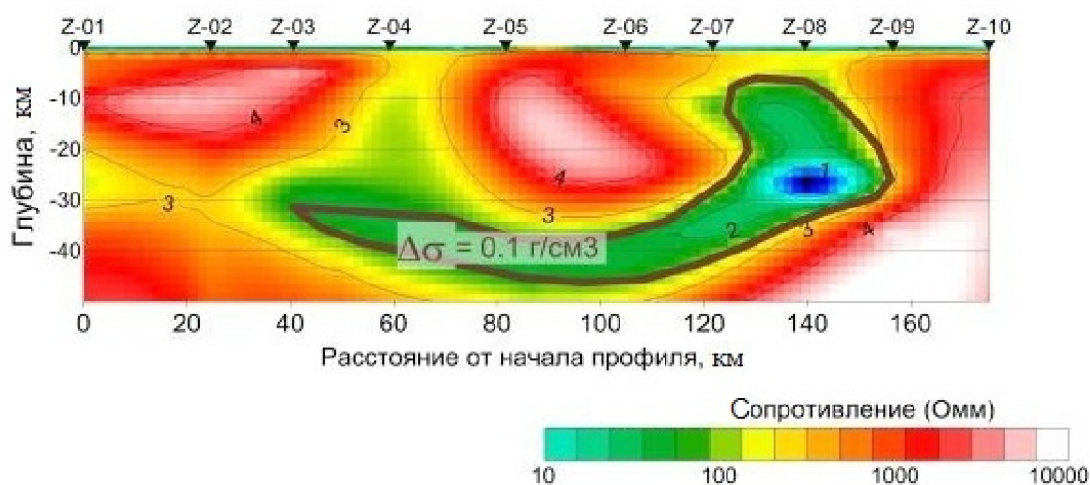
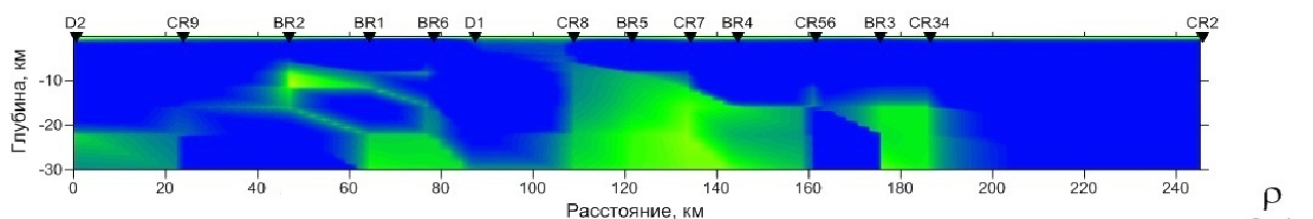


Рисунок 8. Геоэлектрические разрезы по результатам 2D инверсии по программе Р. Мэки по профилю «Жиздра».

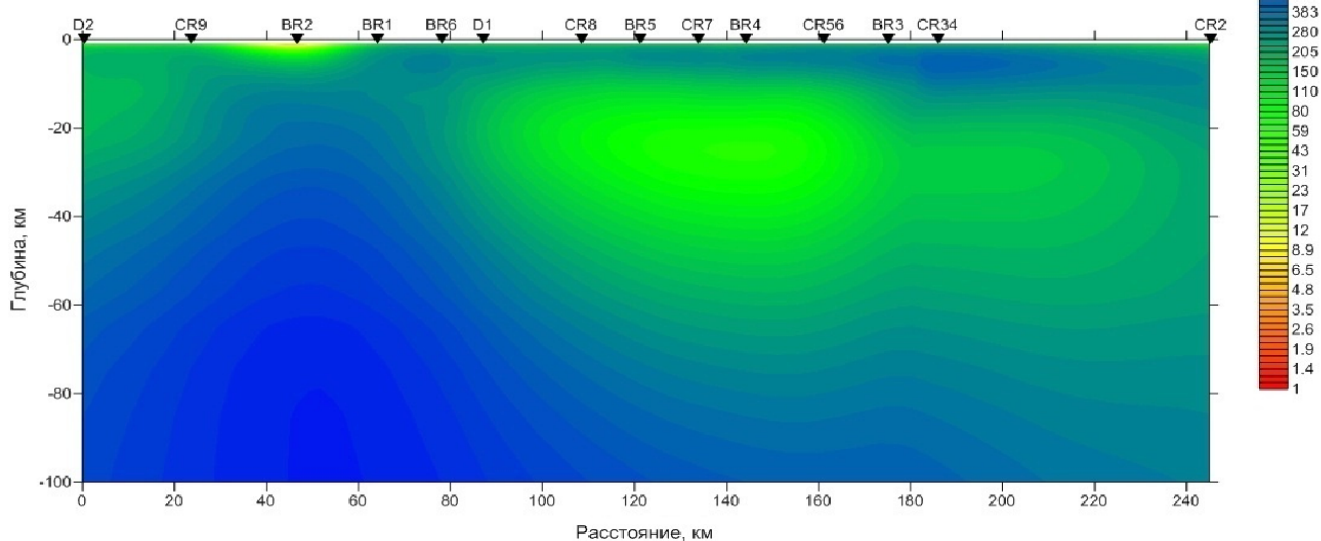
На профиле «Навля» по результатам совместной 2D инверсии проводящая аномалия располагается между точками D1 и BR3 (Рис. 9). На западе и востоке профиля также отмечаются относительно низкие сопротивления, но вряд ли их можно связать с проводником, проявляющемся в центральной части профиля и прослеженным на двух рассмотренных выше профилях. 1D инверсия также даёт сложную картину, но основная проводящая зона и по её результатам относится к центральной части профиля. Отметим, что в ходе анализа МТ-данных в точке BR2 выявлено влияние 3D эффектов.

При покомпонентной инверсии МТ-данных на профиле «Навля» вновь наибольшая невязка отвечала продольному импедансу, а на соответствующем разрезе аномалия

проводимости протягивается почти по всему профилю на глубинах от 10 до 40 км. На разрезах же, полученных как по поперечному импедансу, так и по типперу, коровая аномалия видна на точках D1 – BR3, глубина её верхней кромки 10 км, и имеются проводящие «корни» аномалии, причём в случае поперечного импеданса они наклонены на запад, а в случае типпера – на восток.



Геoeлектрический разрез по результатам 1D инверсии по программе OCCAM по профилю Навля.



Геoeлектрический разрез по результатам 2D инверсии по программе REBOCC по профилю Навля.

Рисунок 9. Геoeлектрические разрезы по профилю «Навля».

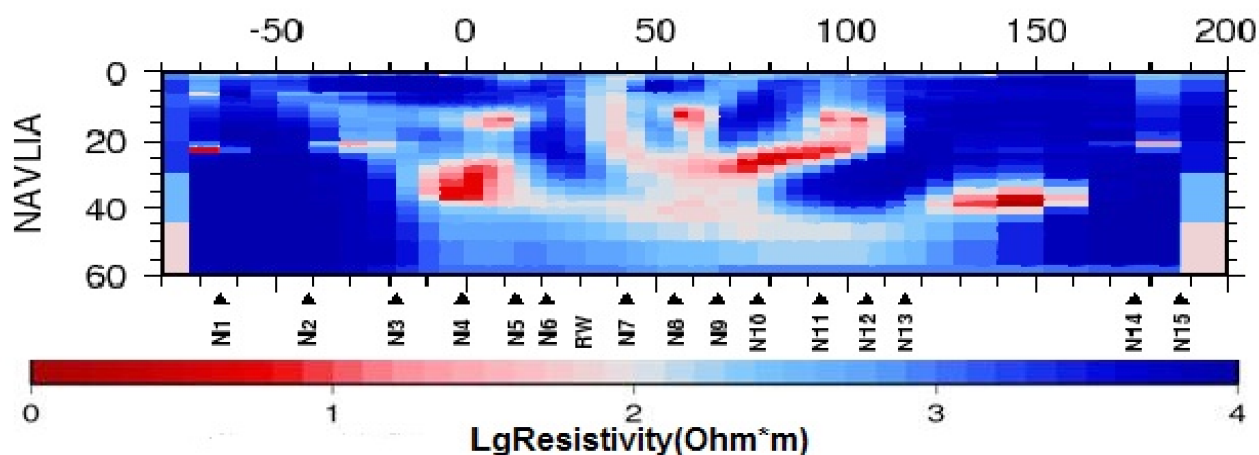


Рисунок 10. Геoeлектрические разрезы по результатам 2D инверсии по программе Ив.М. Варенцова по профилю «Навля».

Рассмотрим разрез, полученный в результате 2D инверсии по программе Ив.М. Варенцова по профилю «Навля» (рис. 10). Аномалии на этом разрезе имеют более разрозненный характер. Тем не менее, наиболее проводящая область расположена в центре профиля на глубинах от 10 до 40 км.

Яркая коровая аномалия проводимости располагается в восточной части профиля «Суземка», между точками S4 и S8 (рис. 11). Положение проводника, форма его кровли, а также вмещающая часть разреза по результатам 1D и 2D инверсий примерно совпадают. Глубина кровли коровой аномалии составляет от 10 км и ширина – порядка 70 км. По глубине аномалия, в пределах разрезов, не ограничена.

На рисунке 12 на всех разрезах в восточной части присутствует четко выраженная коровая аномалия проводимости. Также на разрезе, построенном по результатам инверсии продольного импеданса, под точками G5 и S0 присутствует еще одна небольшая аномалия, но она может быть связана с гальваническими искажениями. А на разрезе, полученном в результате инверсии поперечного импеданса, присутствуют линейные субгоризонтальные относительно проводящие аномалии, которая проходят через весь профиль на глубинах 10-25 км и 70-100 км. На разрезе, построенном в результате инверсии типпера, присутствует проводящая аномалия под точками G1 – G3. Возможно, на западном краю профиля также присутствует коровый проводник.

На рисунке 13 показаны результаты 2D инверсии МТ данных по профилю «Суземка» по программе Ив.М. Варенцова [Варенцов и др., 2013]. Можно отметить следующие сходства разрезов: в восточной части профиля присутствует мощная проводящая аномалия, правда, на глубинах от 35 км; в западной части – субгоризонтальные проводящие аномалии несколько большего сопротивления. Сильно различны центральные части разрезов: на разрезе на рисунке 13 присутствует проводящая аномалия, которая не видна на разрезах по результатам инверсии в программе REBOCC. Однако авторы [Варенцов и др., 2013] отмечают, что в центральной части профилей Шостка (см. ниже) и Суземка существенно влияние помех от электрофицированной железной дорогих, а на профиле Суземка в его западной части в качестве дополнительной помехи выступает магистральный газопровод.

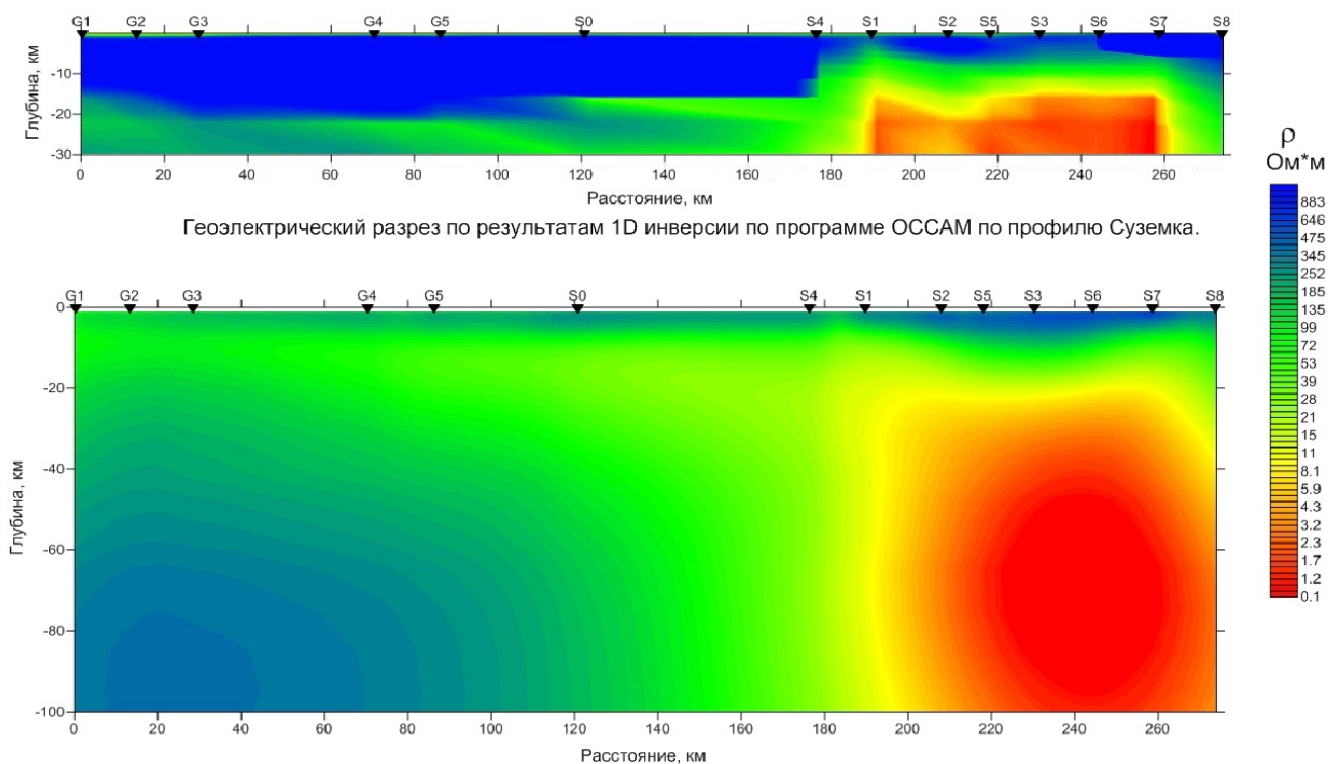


Рисунок 11. Геозэлектрические разрезы по профилю «Суземка».

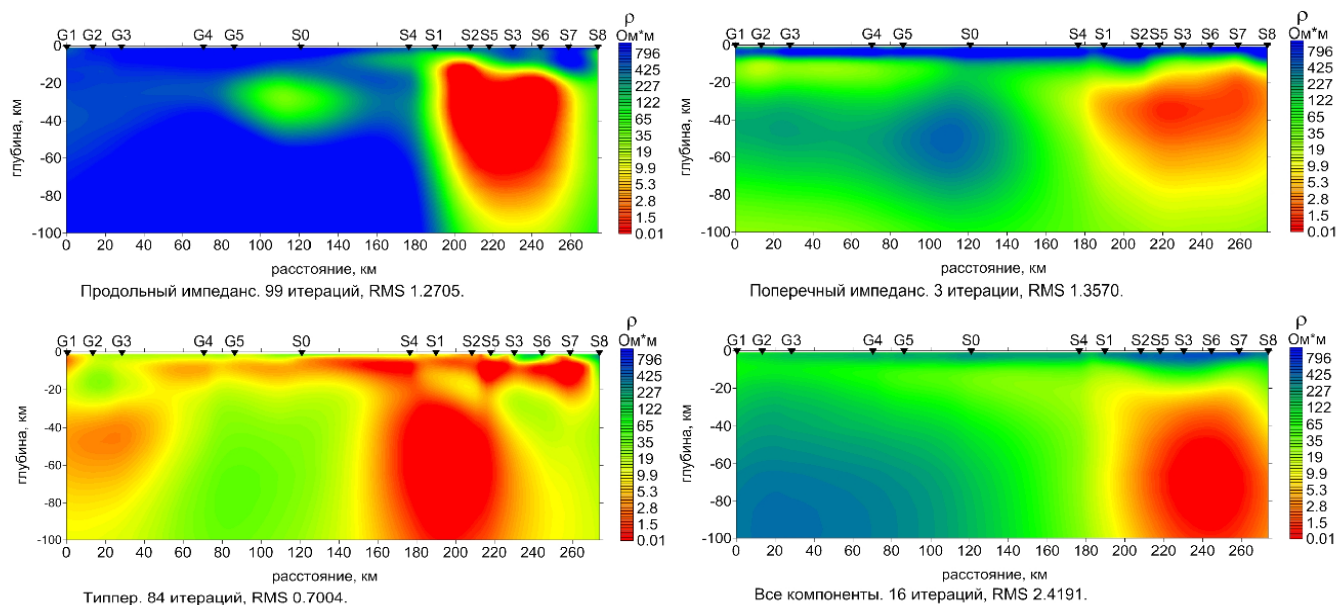


Рисунок 12. Геозэлектрические разрезы по результатам покомпонентной и совместной 2D инверсии по программе REBOCC по профилю «Суземка».

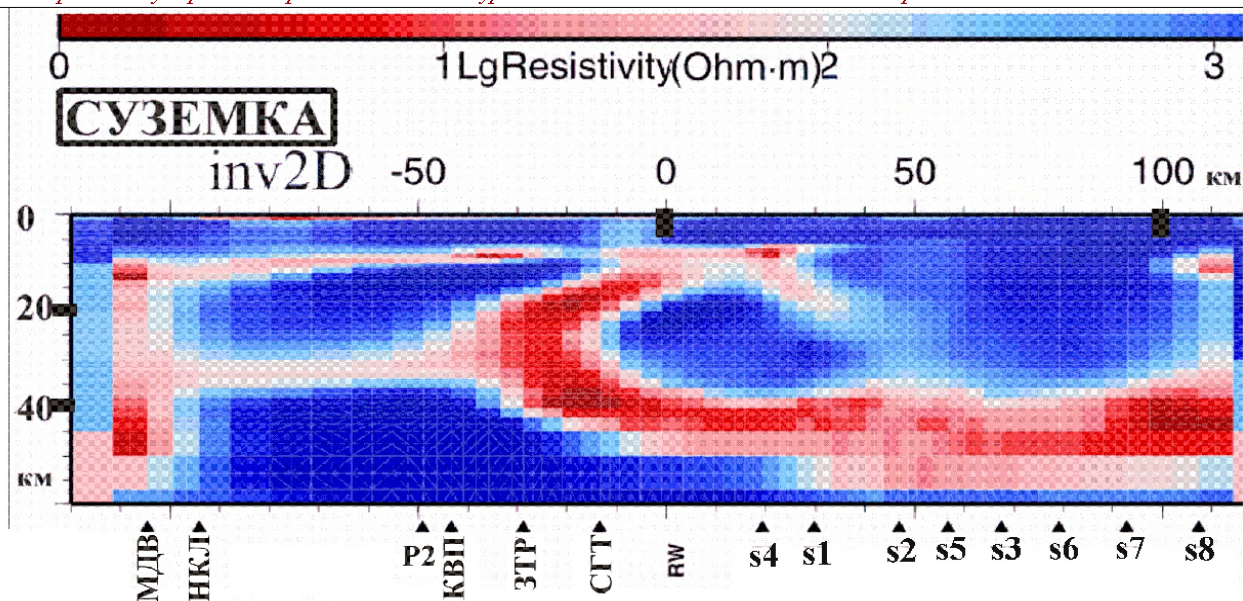


Рисунок 13. Геоэлектрические разрезы по результатам 2D инверсии по программе Ив.М. Варенцова по профилю «Суземка».

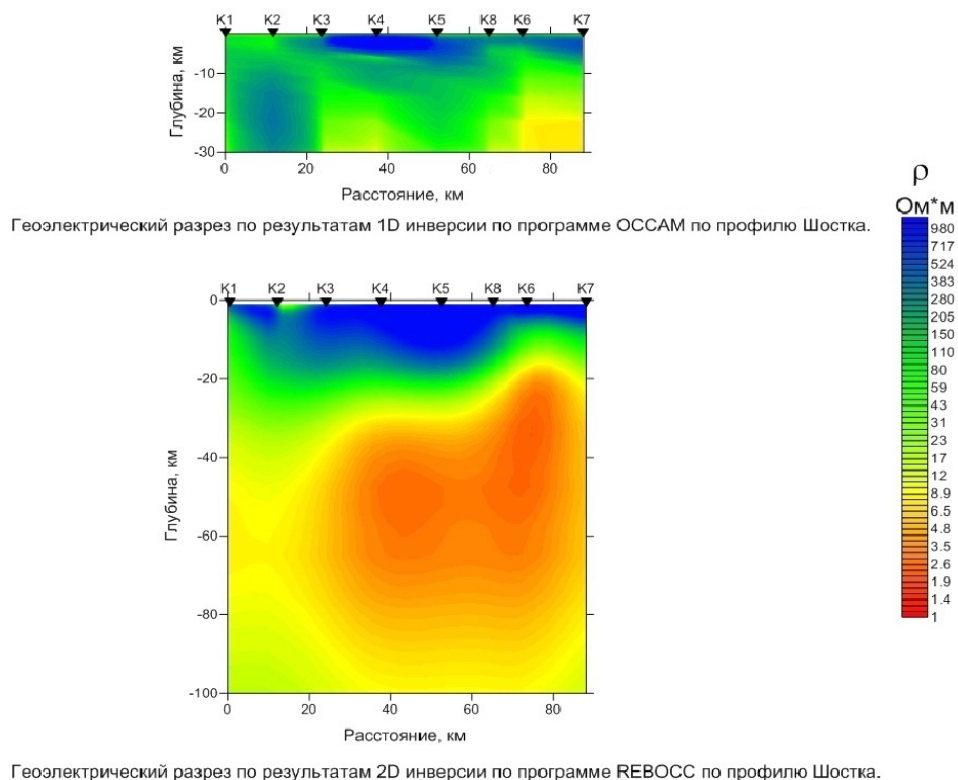


Рисунок 14. Геоэлектрические разрезы по профилю «Шостка».

На профиле «Шостка» коровая аномалия проводимости видна почти на всей его длине и погружается с востока на запад. Глубины восточной части составляют порядка 10 км, а западной – 30 км (рис. 14). Кровля аномалии имеет схожие очертания на разрезах по двумерной и одномерной инверсиям.

Примерно такую же конфигурацию аномалия имеет и на разрезах, сделанных в результате раздельных инверсий продольного импеданса и поперечного импеданса. При этом по поперечному импедансу аномалия получается более проводящей. При инверсии типпера проявилась лишь верхняя часть аномалии.

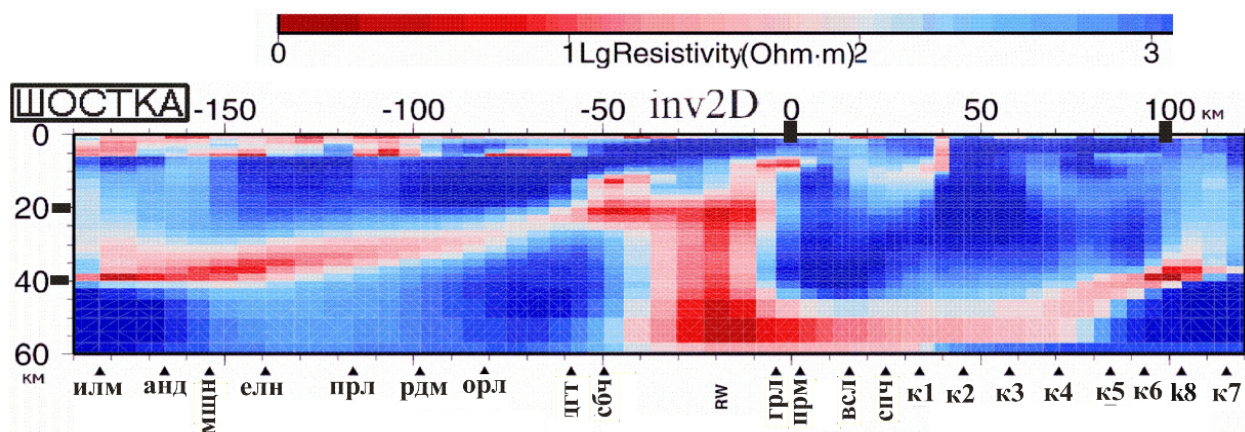


Рисунок 15. Геоэлектрические разрезы по результатам 2D инверсии по программе Ив.М. Варенцова по профилю «Шостка».

Сопоставим наш разрез с разрезом, полученным в результате 2D инверсии МТ данных по профилю «Шостка» по программе Ив.М. Варенцова (рис. 15). Необходимо отметить, что разрезы имеют разную длину, разрез, сделанный по программе Ив.М. Варенцова, продолжается на запад, на территорию Украины. Однако видно, что та аномалия, которая присутствует на обоих разрезах, имеет похожий угол падения, хотя на последнем разрезе глубина её залегания выше.

При 2D инверсии МТ данных на самом южном профиле, «Обоянь», не удалось получить правдоподобных разрезов и добиться небольших невязок. Вероятно, на этом профиле сильно сказываются 3D эффекты.

### Заключение

Таким образом, с использованием 1D и 2D инверсии нами построены геоэлектрические разрезы по пяти профилям. Использовать 1D инверсию при глубинных исследованиях целесообразно для обнаружения аномалообразующих тел и понимания общих закономерностей фонового разреза. При наличии в разрезе горизонтальных неоднородностей более-менее достоверная картина получается до глубин порядка 30 км, ниже, как правило, уходят ложные «корни» аномалий.

Результаты 2D инверсии по программе REBOCC неплохо коррелируют с результатами, полученными ранее с помощью других программ. Отметим, что аномалии,

полученные нами, имеют более гладкую форму, тем не менее, положение и глубины корового проводника принципиально не отличаются.

Инверсия вначале проводилась с весами кажущихся сопротивлений по умолчанию, но при уменьшении этих весов на порядок результаты улучшались, и в статье представлен именно этот вариант. В ряде случаев возникали проблемы с инверсией продольного импеданса, поскольку он теоретически связан только с индукционными эффектами, а в данных проявлялись также и гальванические. Впрочем, в большинстве случаев коровые аномалии в том или ином виде проявлялись на разрезах, построенных по всем компонентам. Разрезы по отдельным компонентам позволяют понять, какие из них внесли какой вклад в результаты совместной инверсии.

Коровые аномалии проявились на всех профилях. Отметим, что на трёх северных профилях аномалии коровой проводимости обладают меньшей проводимостью, чем на двух южных. Вероятно, речь идёт о разных по природе и структуре аномалиях. На северных профилях проявляется Бярятинская аномалия. На южных профилях, по-видимому, подсечена Курская аномалия электропроводности.

Известно два основных механизма формирования коровых проводящих аномалий. Первый связан с электронными проводниками (графит, сульфиды), второй – с ионными (вода, расплав). Трудно оценить, какой механизм преобладает в случае Бярятинской и Курской аномалий. Как бы то ни было, по-видимому, эти коровые аномалии представляют собой глубинные проницаемые зоны, обеспечивающие тепломассоперенос и формирование приповерхностных зон повышенных температур и концентрации различных полезных ископаемых.

Представленные результаты носят предварительный характер. Работы в рамках проекта «Кировоград» продолжаются, сгущается сеть точек на рассмотренных профилях, появляются новые профили. Это позволит более детально изучить структуру аномалий и, в результате сопоставления с другими геолого-геофизическими данными, точнее оценить их природу.

### Список литературы

1. Александрова Е.Д., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Горбунов А.А., Иванова С.В., Куликов В.А., Модин И.Н., Пушкарев П.Ю., Хмелевской В.К., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей, под ред. Хмелевского В.К., Модина И.Н., Яковлева А.Г. Москва, Изд-во ГЕРС, 2005, 311 с.



2. Александрова Е.Д., Варенцов Ив.М., Верещагина М.И., Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Соколова Е.Ю., Шустов Н.Л., Хмелевской В.К., Яковлев А.Г. Электромагнитные зондирования осадочного чехла и консолидированной земной коры в зоне перехода от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе: проблемы и перспективы. Физика Земли, 2010, № 8, с. 62-71.
3. Александрова Е.Д., Варенцов Ив.М., Куликов В.А., Логвинов И.М., Лозовский И.Н., Пушкарев П.Ю., Соколова Е.Ю., Тарасов В.Н., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы. Геофизика, 2013, № 2, с. 32-38.
4. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва, Научный мир, 2009, 680 с.
5. Варенцов Ив.М. Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах. Физика Земли, 2002, № 11, с. 11-33.
6. Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Куликов В.А., Логвинов И.М., Трегубенко В.И., Яковлев А.Г., Рабочая группа KIROVOGRAD. Синхронные магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования на западном склоне Воронежского массива. Геофизический журнал, 2012, № 4, с. 90-107.
7. Варенцов Ив.М., Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Трегубенко В.С. Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы). Киев, Логос, 2013, 118 с.
8. Варенцов Ив.М., Александрова Е.Д., Баглаенко Н.В., Куликов В.А., Логвинов И.М., Соколова Е.Ю., Рабочая группа KIROVOGRAD. Массив синхронных МТ/МВ зондирований KIROVOGRAD: первые модели 2D инверсии. Материалы V Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по ЭМ зондированиям Земли, Т. 1. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2011, с. 188-194.
9. Иванов П.В. Программное обеспечение МТ\_Array для анализа магнитотеллурических данных. Материалы XVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов». Москва, МГУ, 2010.
10. Constable S., Parker R., Constable C. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 1987, Vol. 52, No. 3, p. 289-300.
11. Rodi W., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. Geophysics, 2001, Vol. 66, pp. 174-187.
12. Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. Geophysics, 2000, Vol. 65, No. 3, p. 791-803.