

Геоэлектрическая модель земной коры и верхней мантии вдоль профиля ГСЗ Новоазовск—Титовка

© И. М. Логвинов, В. Н. Тарасов, 2015

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 1 сентября 2014 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Наведено результати двовимірної інверсії магнітотелуричних даних уздовж профілю ГСЗ Новоазовськ—Титовка. В межах Донбасу виділено два об'єкта зниженого опору (які зумовлюють Донбаську аномалію провідності). Один об'єкт залягає в осадових породах (в інтервалі глибин 1—10 км) у південній частині регіону, інший — в центральній частині (в інтервалі глибин 1—18 км) і проникає в консолідовану кору. Загальна інтегральна провідність об'єктів порядку $3 \cdot 10^8$ См · м. Просторово об'єкти добре корелюють з вугленосними породами карбону.

Ключові слова: електропровідність, земна кора та верхня мантия, Донбас.

Введение. Магнитовариационными исследованиями с использованием аналоговых станций было обнаружено аномальное поведение магнитовариационных параметров (вызванное Донбасской аномалией электропроводности — ДАЭ) на профиле Таганрог—Новопсков [Рокитянский и др., 1988]. В дальнейшем цифровыми станциями первого поколения были выполнены магнитотеллурические зондирования в десятках пунктов на территории всего Донбасса [Ингеров, 1989; Ингеров и др., 1990]. По полученным данным проведено численное моделирование (прямая задача) и построены геоэлектрические модели для южной части Донбасса в районе профилей ГСЗ: XI [Рокитянский и др., 1989, 1994] и X [Логвинов, Лысенко, 1995].

Задача настоящей работы — построение геоэлектрической модели вдоль профиля ГСЗ XI с помощью численного моделирования (обратная задача) с использованием новых данных, полученных современными цифровыми станциями в 15 пунктах на этом профиле. Кроме того, рассматривается связь геоэлектрических параметров с другими геолого-геофизическими данными и обсуждается возможная природа выделенных объектов пониженного сопротивления.

Экспериментальные данные. В 2012—2013 гг. проводились наблюдения вариаций магнитотеллурического поля (МТ поля) Земли современ-

ными цифровыми станциями в 15 пунктах на профиле ДБ-I от Приазовского массива Украинского щита до южного склона Воронежского массива, пересекающем Донбасс (рис. 1, а). Линия профиля практически совпадает с профилем ГСЗ XI (Новоазовск—Титовка) [Pshenko, Stepanenko, 1998] на участке последнего от пк50 до пк280.

Регистрация вариаций МТ поля осуществлялась современными цифровыми станциями с шагом дискретизации 1—5 с. Интервал регистрации на каждом пункте составлял 3—5 суток. Обработка вариаций МТ поля на всех пунктах выполнена по одноточечной схеме и с применением референтного пункта (в качестве которого взята геомагнитная обсерватория “Киев”). Всего было использовано пять различных программ обработки, список которых приведен в работе [Логвинов и др., 2013].

Район исследований изобилует электрифицированными железными дорогами, рудниками и шахтами, что создает значительные помехи в измеряемых компонентах на некоторых пунктах. На этапе предпроцессинга на всех пунктах были применены специальные программы, разработанные авторами, позволяющие устранять бытовые и промышленные помехи из записей без искажения вариаций естественного МТ поля.

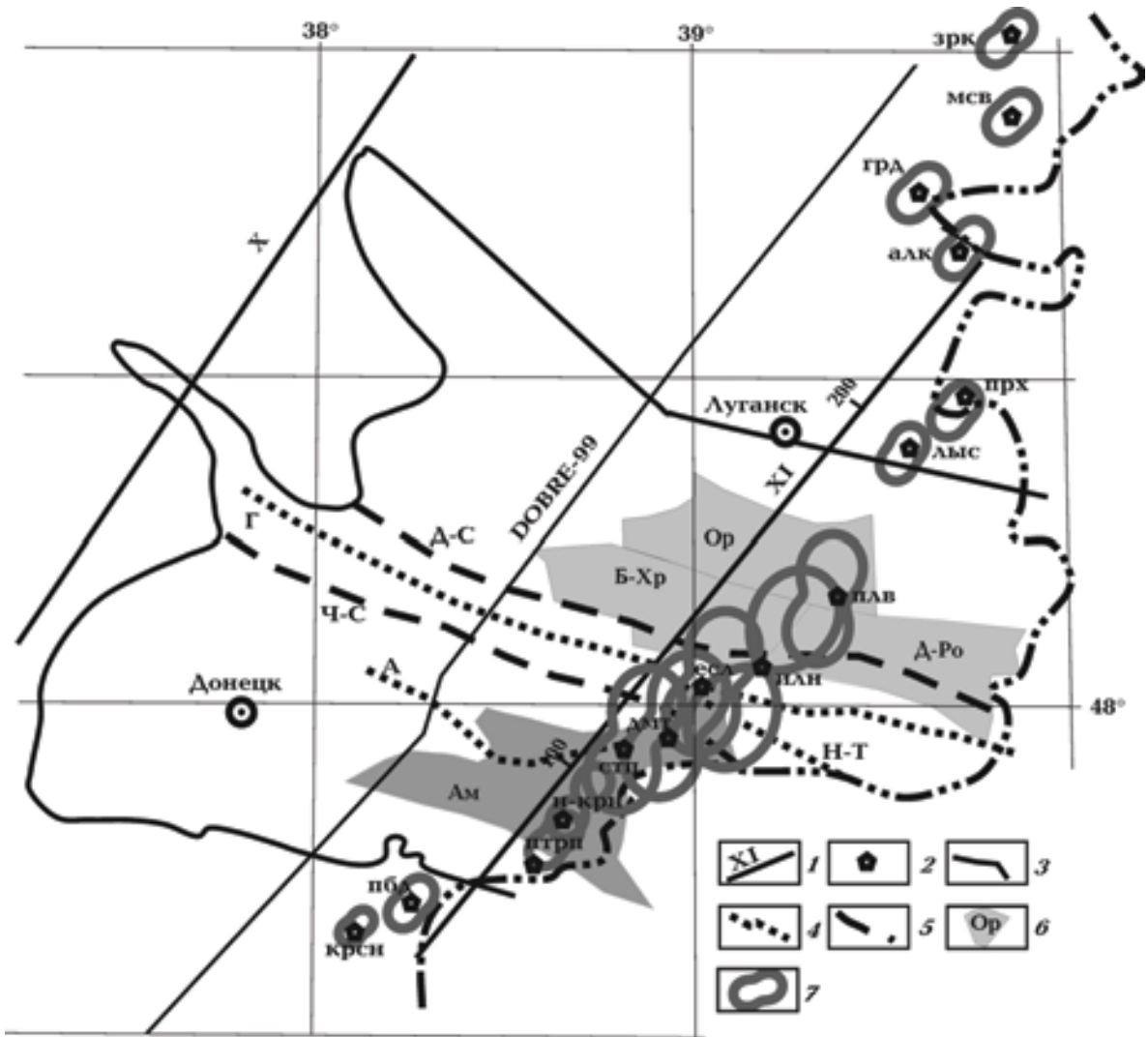


Рис. 1. Расположение сейсмических профилей (1) и пунктов геоэлектрических наблюдений (2), по [Логвинов и др., 2013] (крсп — Краснополка, пбд — Победа, птрп — Потропавловка, н-крн — Нижнекрынское, стп — Степановка, дмт — Дмитровка, есл — Есауловка, илн — Ильинка, плав — Палиевка, лыс — Лысое, прх — Пархоменко, алк — Александровка, град — Городище, мсв — Мусиевка, зрк — Зоряковка); 3 — граница Складчатого Донбасса; 4 — антиклинали (Г — Главная, Н-Т — Нагольно-Тарасовская, А — Амвросиевская); 5 — синклинали (Ч-С — Чистяково-Снежнянская, Д-С — Должанско-Садкинская); 6 — угленосные районы, по [Геология ..., 1963], (Ам — Амвросиевский, Д-Ро — Должанско-Ровенецкий, Б-Хр — Боково-Хрустальский, Ор — Ореховский); 7 — полярные диаграммы M_h .

В результате обработки полученных данных были определены импедансы и магнитные переходные функции (МПФ) в диапазоне периодов от 9 — 16 до 6400 — 10 800 с. Амплитуды и фазы МПФ определены с точностью 0,01 — 0,03, а их фазы — до 5°. Магнитотеллурические параметры определены с точностью порядка 7—10% (в пунктах с большим уровнем помех около 20%) по модулям и 5—7° по фазам.

Особенностью работы является определение горизонтального магнитовариационного оператора (M_h) с помощью программы [Varen-

tsov, 2007]. Все оценки выполнены относительно геомагнитной обсерватории "Киев", что позволяет сопоставлять значения M_h , полученные при исследованиях в разные годы. На рис. 1, б в качестве примера приведены полярные диаграммы M_h вдоль профиля для одного из периодов в диапазоне максимума частотной характеристики. Четко видно резкое увеличение M_h на участке профиля от стпн до плав.

Следует отметить, что в случае применимости двумерной модели к проводящему объекту должно соблюдаться определенное поведение

импедансов и магнитных переходных функций (индукционных векторов и M_h). Азимуты реальной части индукционного вектора (Cu) и направление максимума полярной диаграммы M_h должны быть направлены перпендикулярно аномалеобразующему току, азимуты максимума полярной диаграммы импеданса (Az Z_{max}) — вдоль направления аномалеобразующего тока над осевой частью объекта (продольная поляризация). Над осевой частью аномального объекта значение Cu близко к нулю. Частотные характеристики достигают максимальных значений: для M_h в пунктах над осевой частью аномального объекта, для Cu в пунктах, расположенных над краями объекта.

Все указанные особенности выполняются в пунктах профиля ДБ-1. При этом необходимо учесть, что наиболее точные значения азимутов определяются в характерных частях профиля, которые указаны выше, над двумерной аномалией проводящего объекта. На рис. 2 приведено поведение всех интерпретационных параметров на пунктах профиля в характерных частях профиля. Как справедливо отмечал И. И. Рокитянский " ... формирование аномального поля в Z-компоненте происходит путем интегрирования аномальных полей на значительном участке профиля ..., а в горизонтальной компоненте ... — более локально" [Рокитянский и др., 1989]. Этой особенностью формирования МТ

поля может объясняться некоторое расхождение азимутов простирания оси аномалеобразующего объекта, определяемое по различным переходным функциям МТ поля.

Совместный анализ всех интерпретационных параметров МТ поля подтверждает вывод о локальных неоднородностях проводимости в южной части Донбасса, которые допускают использование двумерного моделирования [Логвинов и др., 2013].

Двумерная инверсия. Для инверсии использовалась программа REBOCC [Siripunvarorn, Egbert, 2000] на основе алгоритма OCCAM. Особенность методики программы REBOCC в данной работе — применение ключей программы инверсии, позволяющих учитывать реальное наличие экспериментальных данных для каждого параметра, в каждом пункте и на каждом периоде.

Построение интерпретационной модели. Для составления первоначальной интерпретационной модели использовалась априорная геолого-геофизическая информация о строении региона:

- мощность пород осадочного чехла взята согласно сейсмическим данным [Пиченко, Степаненко, 1998];
- значения удельных электрических сопротивлений (ρ) осадочных пород заимствованы из литературных источников (обсуждение ко-

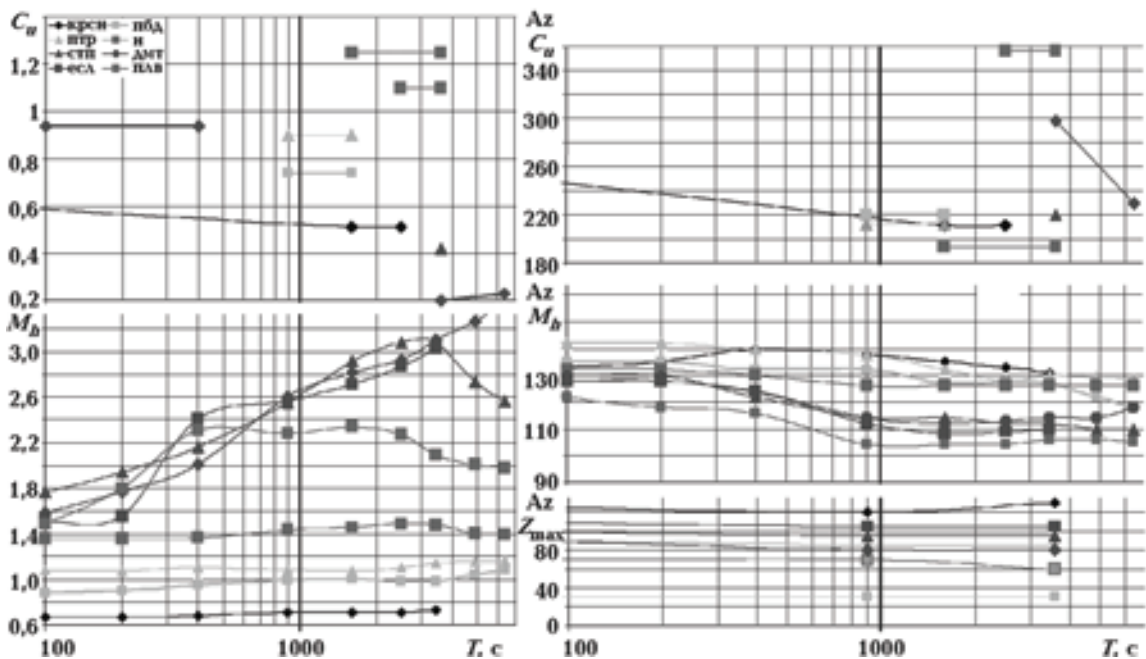


Рис. 2. Основные характеристики интерпретационных параметров МТ поля на пунктах профиля ДБ-1.

торых приведено ниже) с учетом результатов интерпретации магнитотеллурических данных вдоль сейсмического профиля ГСЗ Х [Логвинов, Лысенко, 1995] и карты суммарной продольной проводимости ДДВ [Логвинов, 2002];

- геоэлектрические параметры для кристаллических пород земной коры и верхней мантии были использованы по результатам инверсии кривой индукционного зондирования на геомагнитной обсерватории "Киев" [Semenov et al., 2008].

Шаг моделирования по горизонтальной и вертикальной осям подобран таким образом, чтобы геометрические параметры модели удовлетворяли условиям распространения МТ поля в среде. Учитывая частотный диапазон экспериментальных данных и длину профиля (порядка 250 км), максимальная глубина модели, для которой искалось распределение геоэлектрических параметров, не превышала 90 км, т. е. результаты моделирования полностью освещают всю мощность земной коры и часть верхней мантии региона.

Магнитные переходные функции и расстояния между пунктами были спроектированы на линию, перпендикулярную предположительной оси простираения аномального проводника (азимут оси принят согласно азимуту M_h). Данные МТЗ (в виде значений кажущихся сопротивлений — ρ_k и фазы импеданса — ϕZ) использовались согласно главным направлениям импеданса (определенным по полярным диаграммам).

Методически моделирование выполнялось в три этапа. На первом проводился анализ интерпретационных параметров (продольные кривые МТЗ — ТЕ-мода или МПФ — ТР-мода), которые при решении обратной задачи обеспечивают наименьшие значения rms (среднеквадратичные оценки по всему многокомпонентному ансамблю невязок, нормированных на погрешности данных) по периодам и по пунктам.

В результате установлено, что инверсия с использованием ТЕ-моды дает наименьшие rms по сравнению с использованием ТР-мод или ТМ-мод (поперечные кривые МТЗ). Модель te_m10 (rms менее 2,4 — "лучшая" модель) применялась при инверсии с привлечением данных ТР- и ТМ-мод. Общая невязка для "лучшей" модели варианта te-tr-tm_m03 (рис. 3) возрастает в 1,2 раза при добавлении к данным ТЕ-моды данных ТР- и ТМ-мод.

Для оценки геоэлектрических характеристик выделяемых объектов пониженного сопротивления (ОПС) использовалась интегральная проводимость объекта $G = \Sigma(Q/\rho)$ (где Q — площадь поперечного сечения блока пород постоянного сопротивления, м²; ρ — сопротивление блока пород, Ом·м) [Рокитянский, 1975]. Основное влияние на значение G оказывают мощные по интегральной проводимости проводники, поэтому на результирующих рисунках не показаны участки с сопротивлением более 100 Ом·м, которые дают менее 10 % вклада в интегральную проводимость. Градация сопротивлений на рис. 3 выполнена таким образом, чтобы объекты, сопротивление которых в несколько раз меньше, чем во вмещающей среде, выделялись более отчетливо.

На обоих вариантах моделей на фоне пород с $\rho > 100$ Ом·м выделяется шесть ОПС (О1—О6), четыре из которых находятся в осадочном чехле. Наиболее проводящие части объектов О5 и О6 расположены в нижней части коры и в мантии. Общие оценки геоэлектрических параметров выделенных ОПС приведены в табл. 1.

Значения суммарной продольной проводимости осадков (S_{oc}) по профилю ДБ-1 существенно различаются. Изменения S_{oc} соответствуют как мощности наиболее проводящих частей осадков, так и их расположению по латерали. В качестве первого может быть принят слой мощностью 500 м ($S < 50$ См) юго-западнее Донбасса и северо-восточнее пункта плав.

Т а б л и ц а 1. Геоэлектрические параметры объектов пониженного сопротивления для модели tp-te-tm_m03

Параметры		О1А	О1Б	О2	О3	О4	О5	О6
Глубина, км	кровли	3	1	2	1,5	1,5	46	20
	центра	6	2	6	2	4	60	32—60
Ширина, км		24	24	15	15	12	27	21
$G \cdot 10^8$, См·м		1,3	0,76	1,46	0,07	0,14	0,28	1,08

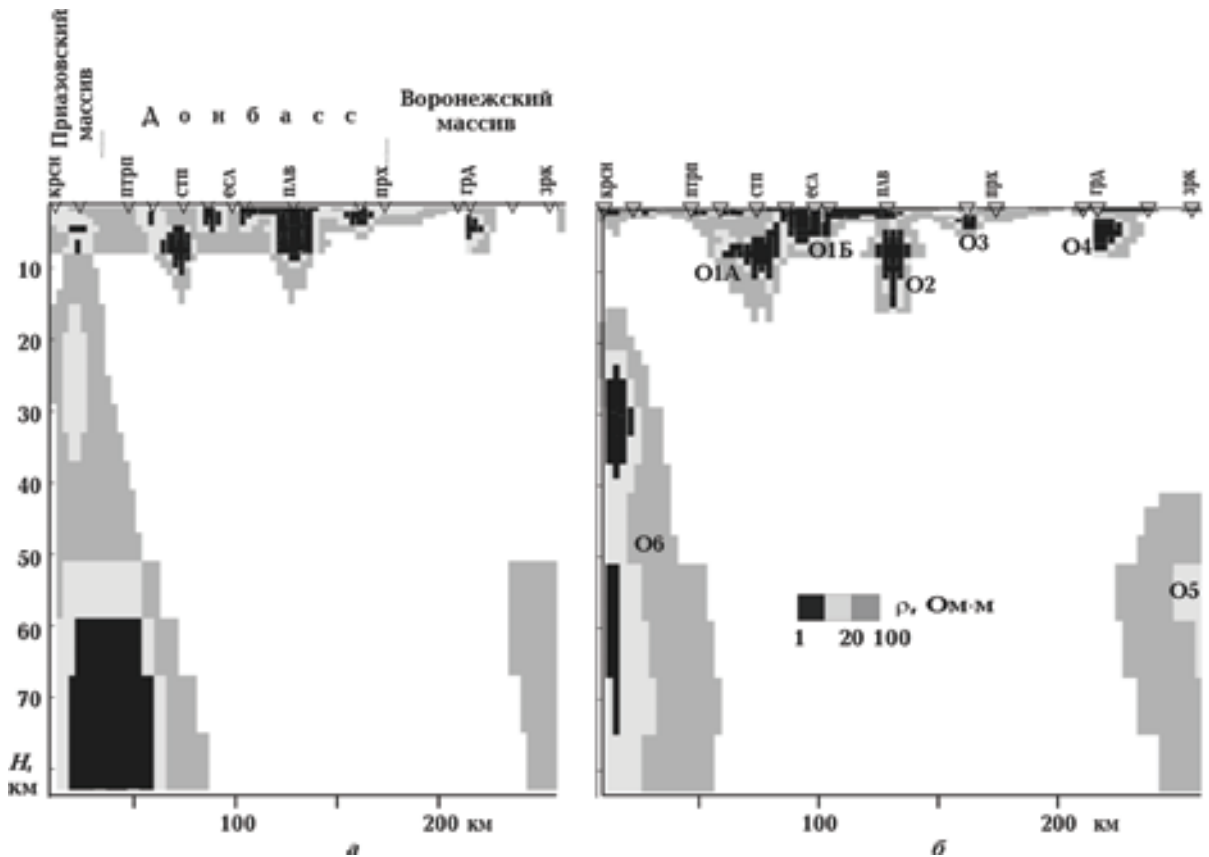


Рис. 3. Геоэлектрические модели по данным 2D инверсии: *a* — te_m10, *б* — te-tr-tm_m03.

Наибольшие значения S_{oc} наблюдаются на всей территории Донбасса, достигая 400 См и более над объектами O1 и O2.

На территории складчатого Донбасса выделяются два блока с очень большими значениями G (O1 и O2). Суммарное значение G обоих блоков (более $3 \cdot 10^8$ См·м) превосходит суммарное значение региональных Кировоградской и Карпатской аномалий [Гордиенко и др., 2005, 2011]. Менее уверенно выделяется блок O3. Оценка его параметров основана на данных в основном только одного пункта (лыс), значения gms для ТЕ-, ТР- и ТМ-мод наибольшие из всех экспериментальных данных вдоль профиля. Параметры объектов O5 и O6 требуют уточнения, так как они выделены на краях профиля и экспериментальные данные не полностью обеспечивают характеристику аномального поведения МТ поля от этих объектов.

Объекты пониженного сопротивления O1—O4 (от долей омометров до 10—30 Ом·м) расположены в верхней части земной коры на глубине не более 10 км. Сопротивление пород ниже 10 км вплоть до глубины 80—90 км на всем

протяжении профиля составляет более сотни омометров, за исключением участков, включающих объекты O5 и O6. Сопротивление пород в блоке O5 изменяется в интервале 20—80 Ом·м. Блок O6 может быть представлен двумя частями (одна с центром на глубине 32 км, вторая — на 60 км), которые объединены в рамках среды с сопротивлением менее 100 Ом·м (см. рис. 3). Верхняя часть, расположенная в земной коре, характеризуется сопротивлением 4—20 Ом·м, в нижней, расположенной в верхней мантии, сопротивление изменяется в интервале 10—30 Ом·м.

Обсуждение результатов. Сравним полученные геоэлектрические модели с имеющейся геолого-геофизической информацией.

На первом этапе сопоставим результаты двумерного моделирования (рис. 4), полученные по инверсии (МО) и по решению прямой задачи (МП) [Рокитянский и др., 1994].

Трудности сопоставления связаны с тем, что: в прошлом веке вся графика выполнялась с использованием карт искаженного масштаба; отсутствием сведений в работе [Рокитянский и др., 1994] о простирации профиля моделирования.

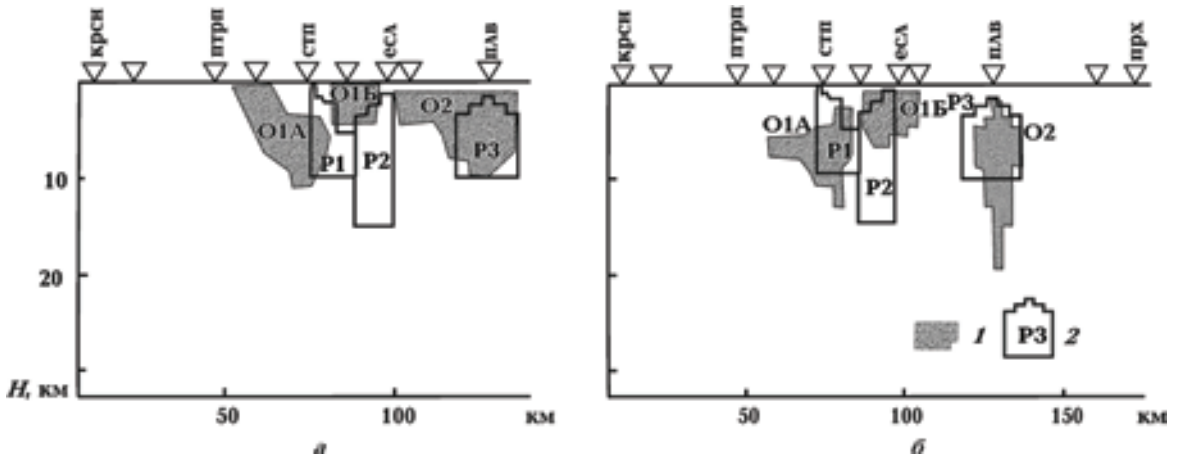


Рис. 4. Сопоставление результатов 2D моделирования по инверсии (1) и прямой (2) задаче для моделей: а — te_m10, б — te-tp-tm_m03. Аббревиатура О1—О2 соответствует результатам настоящей работы, а Р1—Р3 — работе [Рокитянский и др., 1994].

Как видно из рис. 4, горизонтальное положение объектов, объясняющих ДАЭ, близкое (особенно для модели te-tp-tm_m03), за исключением объекта Р2. Сопоставление характеристик отдельных объектов можно произвести только по значению G , так как при решении прямой задачи значения сопротивлений были постоянны для всего объема объекта. Получены следующие величины соотношения G_{MO}/G_{MP} : объект О1А/Р1 — 1,5, О1Б/Р2а — 2, О2/Р3 — 1. Значение G объекта Р2б почти в 2 раза превосходит суммарное значение G объектов О1 и О2. Резкое различие наблюдается не только в геоэлектрических параметрах объектов собственно ДАЭ, но и в распределении ОПС в земной коре и верхней мантии вдоль профиля, что обусловлено особенностями решений прямой и обратной задач. В первом случае в пределах закрепленного объема аномалеобразующих объектов необходимо найти подходящее сопротивление, во втором подбираются геоэлектрические параметры модели вдоль всего профиля. Для объекта Р2б сложно объяснить природу столь низкого значения $\rho = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (такое значение имеет морская вода открытого океана с соленостью порядка 35 промилле).

В осадочном чехле территории, пересекаемой профилями ГСЗ X и XI (рис. 5) выделяются три блока, различающиеся по распределению скоростей распространения сейсмических волн (V_p) [Pchenko, Stepanenko, 1998]. По представлениям геологов [Александров и др., 1996], слой с $V_p = 5,5 \div 5,6 \text{ км/с}$ относится к девонским отложениям. Выше находится слой с $V_p = 5 \div 5,4 \text{ км/с}$, который соответствует каменноуголь-

ным (карбонным) отложениям, слой с $V_p = 5,8 \div 5,9 \text{ км/с}$ — предположительно рифейским. Осадочные породы подстилаются слоем с $V_p = 6,1 \div 6,2 \text{ км/с}$, обычно отождествляемым с кристаллическими породами.

Согласно сейсмогеологическому разрезу профиля XI, объекты О1—О3 почти полностью располагаются в осадочном слое. Корни объекта О2 уходят в консолидированную земную кору (рис. 5, а). Наибольшие по значению G объекты О1 и О2 находятся в пределах Донецкого складчатого сооружения и охватывают основные угленосные районы (см. рис. 1). В районе Главной антиклинали (объект О1Б) пониженными сопротивлениями характеризуется вся толща пород от поверхности Земли до рифейских отложений. Слой пониженных скоростей ($V_p = 6,0 \text{ км/с}$), расположенный севернее пк 150, не отражается пониженными сопротивлениями.

При геоэлектрическом моделировании вдоль профиля X [Логвинов, Лысенко, 1995] при решении прямой задачи подбирались параметры зон пониженных значений V_p , выделенных в интервале глубин 5—10 км [Ильченко, 1990], и зоны возможного частичного плавления, согласно [Александров и др., 1996]. Первый проводящий объект ($\rho = 1 \div 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) обусловлен мощной толщей песчано-глинистых отложений от перми до кайнозоя ($V_p < 5 \text{ км/с}$) [Александров и др., 1996]. Зоны пониженных значений V_p сопровождаются ОПС, причем сопротивление объекта, пространственно связанного с Бахмутской котловиной (Бк), намного меньше, чем таковое в Кальмиус-Торецкой котловине (КТк). Моде-

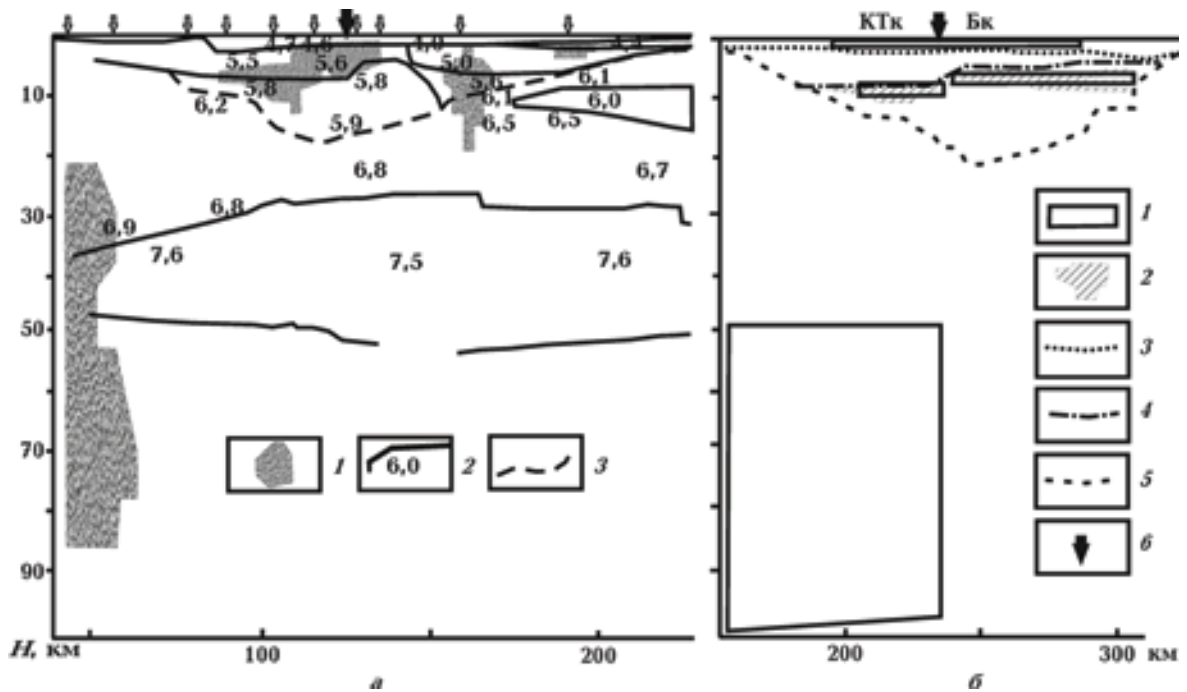


Рис. 5. Геоэлектрический разрез вдоль профиля ДБ-1 и сейсмическая модель вдоль профиля XI, по [Ilchenko, Stepanenko, 1998] (а): 1 — контуры ОПС со значениями $\rho < 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, 2 — преломляющие границы и значения V_p , 3 — подошва осадочных пород; б — геоэлектрическая, по [Логвинов, Лысенко, 1995], и сейсмическая, по [Ильченко, 1990; Ilchenko, Stepanenko, 1998], модели вдоль профиля X: 1 — контуры ОПС, 2 — объекты с пониженными скоростями V_p , 3—5 — сейсмические границы, выше которых значения пластовых V_p менее 4,9 км/с (3), менее 5,4 км/с (4), менее 6,1 км/с (5), 6 — ось Дружковской антиклинали.

лирование показало возможность существования ОПС ($G \sim 0,6 \cdot 10^8 \text{ См} \cdot \text{м}$) в верхней мантии в южной прибортовой зоне Донбасса.

Как следует из приведенного сопоставления, на территории, пересекаемой профилями ГСЗ X и XI, выделяются объекты пониженного сопротивления, по глубине связанные с каменноугольными отложениями. Выделение ОПС (Об для профиля XI) в мантии южной прибортовой части Донбасса подтверждается для обоих профилей. Согласно работе [Евдошук и др., 2002], если и существует перемычка между Днепровским грабеном и Донбассом, то только в верхних частях осадочного чехла. "По строению же кристаллического фундамента, "промежуточного" слоя (с пластовыми скоростями 5,8—6,0 км/с) и более глубоких горизонтов земной коры принципиальных различий не отмечено" [Евдошук и др., 2002]. Кроме того, известно, что степень метаморфизма пород Донбасса увеличивается в юго-восточном направлении [Булат и др., 2008]. Этим можно объяснить изменение геоэлектрических параметров объектов, выделенных на профилях ГСЗ X и XI.

Пространственно в пределах ОПС О1 (ПК90—120 профиля ГСЗ XI) геологами выделяется область предполагаемых скрытых интрузивных тел, которые связаны с различными полиметаллическими месторождениями [Александров и др., 1996]. Над интрузиями (рис. 6) располагаются зоны гидротермально-метасоматического изменения пород, в частности кварц-каолиновые и каолинит-гидрослюдистые (аргилизиты). Метагенетические изменения пород этой области характерны для угленосных толщ, содержащих антрациты и ультраантрациты.

Как следует из рис. 6, объект О1А почти полностью перекрывает одно из предполагаемых интрузивных тел, а О1Б находится над второй интрузией. Необходимо отметить, что интрузивные тела располагаются вдоль простирания Донбасса юго-западнее Главной антиклинали и имеют довольно ограниченные объемы.

В рассматриваемом регионе выделяются два региональных магнитных объекта [Пашкевич и др., 2014]. Один, с кровлей на глубине 10 км, охватывает территорию Приазовского массива вдоль южного борта Донбасса, второй (с намаг-

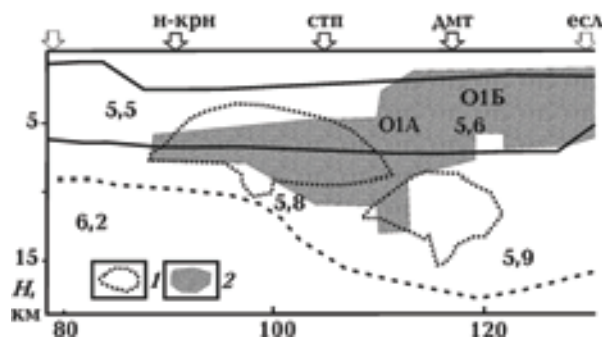


Рис. 6. Геологический разрез зоны магматической активизации в районе Амвросиевского купола, совмещенный с линией сейсмического профиля ГСЗ XI [Александров и др., 1996]: 1 — контуры предполагаемых интрузивных тел, 2 — ОПС О1 со значениями $\rho < 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Остальные обозначения см. на рис. 5.

ниченностью в пределах 2—4 А/м) — зону мелкой складчатости (с кровлей на глубине 10 км) и прилегающую часть Старобельско-Миллеровской моноклинали (с кровлей на глубине 20 км). Профиль геоэлектрических наблюдений (ДБ-1) не пересекает первый объект, но проходит через часть второго объекта. Выделенный на этом профиле ОПС О4 располагается вне пределов второго магнитного объекта. Этот факт свидетельствует о том, что природа ОПС О4 не связана с породами, обладающими высокой намагниченностью.

Природа объектов пониженного сопротивления. Резюмируя результаты приведенного сопоставления, можно сказать, что объекты О1 и О2 (определяющие Донбасскую аномалию электропроводности) связаны с каменноугольными отложениями и проявлениями рудной минерализации, содержащей малое количество магнитных минералов.

Проанализируем известные данные об удельном электрическом сопротивлении пород, составляющих осадочный чехол Донбасса. Известно, что однозначной связи между физическими свойствами пород и их вещественным составом нет, так как существуют первичные факторы, связанные с вещественным составом, и вторичные, обусловленные процессами их преобразования, влиянием поземных вод и поровых растворов.

Влияние гидрологического и гидрохимического режимов на сопротивление пород разного литологического состава неодинаковое. Для песчаников, песчанистых сланцев (алевролитов), насыщенных порово-пластовыми во-

дами, наблюдается сильная зависимость ρ от степени минерализации этих вод. Понятно, что водонасыщенность находится в прямой зависимости от пористости, т. е. от структуры породы и степени диагенеза. Для карбонатных пород (мергелей, известняков, доломитов) основное значение имеют трещинно-пластовые и карстово-пластовые воды. Для глинистых пород (глин, аргиллитов, глинистых сланцев) гидрологический и гидрохимический режимы имеют меньшее значение. Пласты и прослои углей прослеживаются по всему разрезу терригенной толщи донецкого карбона от верхневизейских отложений до отложений верхнего карбона, хотя угольные пласты рабочей мощности (менее 0,45 м) приурочены главным образом к свитам $C_2^3 - C_2^7$ и C_1^3 [Геология ..., 1963].

В работе [Гаркаленко, 1988] было показано, что несмотря на некоторую однотипность разрезов карбоновых отложений Донбасса, представленных частым переслаиванием песчаников и алевролитов, песчано-глинистых и глинистых сланцев (с подчиненными им пластами углей и известняков), их физические характеристики для различных частей бассейна неодинаковы. "В настоящее время выделено 29 геолого-промышленных районов" [Булат и др., 2008]. Анализируемый профиль пересекает угленосные районы (см. рис. 1) — от Амвросиевского на юго-востоке до Ореховского на северо-западе — с низкой угленосностью средне-верхнекарбоновых отложений [Булат и др., 2008]. Более 25% действующих шахт относятся к сверхкатегорийным по метану (что должно повышать ρ метанонасыщенных пород), наименьшее количество негазовых шахт (добывающих негазоносные антрациты) находится в Должанско-Ровенецком районе.

В табл. 2 приведены значения ρ , типичные как для всех угленосных районов бывшего СССР, обобщенные в работах [Гречухин, 1980; Петрофизика ..., 1992], так и данные, касающиеся только Донбасса [Гаркаленко, 1988; Гречухин и др., 1985, 1992]. Кроме того, для сравнения даны и значения ρ , измеренные в последнее десятилетие.

Как видно из табл. 2, значения ρ угольных пластов в Боково-Шахтинском районе (БШр) как минимум в 5 раз меньше, чем для остальных пород разреза. В Ореховском (Ор) и Краснодонском (Крснд) районах, где распространены газовые угли (марки Г), значения ρ угольных пластов близко к удельным электрическим сопротивлениям вмещающих пород. Значения

Т а б л и ц а 2. Удельное электрическое сопротивление пород угольных бассейнов

Породы	ρ, в районах развития угля, Ом · м			Пористость (на глубине 3 км), %	Примечания
	бурый	каменный	антрацит		
Уголь: БШр Ор, Крснд (Западный Донбасс)	10— 50***	50—150**	1—5***	5—7**	—
Аргиллит	5— 10***	8—20***, 20—40**, 100*		5—9**	$V_p = 3 \div 4$ км/с
Аргиллит углистый	10—20**			7—8**	$V_p = 2,2 \div 3$ км/с
Сланцы глинистые: БШр Ор, Крснд	10—100*		30—500*	—	—
Песчаники БШр Ор, Крснд	0— 100*	50—500*	1000* 100— 1000*** 50—400***	—	$V_p = 3 \div 4$ км/с
Алевролит (Западный Донбасс)	0— 30*	20—60* 20—30**	200*	6—9**	
Известняки	100—1000*		20—500***	—	

* — данные из работы [Петрофизика ..., 1992], ** — [Гречухин и др., 1992], *** — [Гаркаленко, 1968].

ρ вмещающих угленосные пласты пород в указанном интервале глубин мало изменяется как в Донбассе, так и на других угольных месторождениях [Шумилова, 2006]. В Донецком бассейне запасы угля разведаны до глубины 1200—1500 м [Булат и др., 2008], соответственно, наиболее точные данные о сопротивлениях пород получены для этих глубин.

Согласно литературным данным, зависимость ρ собственно углей имеет сложную природу: ионная составляющая ρ углей определяется их влажностью и зольностью (количеством и составом минеральных примесей — A_C), а электронная — генетическим составом и степенью метаморфизма (углефикацией) [Гречухин, 1971]. Бурые и каменные угли, антрацит и сланцы относятся к полупроводникам. Проводимость полупроводников резко зависит от различных факторов. Так, иногда достаточно 1% примесных атомов, чтобы проводимость возросла в миллионы раз [Агроскин, 1961]. Рассмотрим возможности влияния указанных причин на образование проводящих объектов Донбасса.

На рис. 7 представлены зависимости ρ от указанных факторов. По вещественно-петрографическому составу угли Донбасса делятся на две группы. К первой относятся клареновые угли среднего, верхнего карбона и намюр-

ские. Ко второй — кларено-дюреновые угли нижнего карбона. Для обеих групп наблюдается падение ρ с повышением зольности каменных углей и обратная зависимость ρ для углей от марок Т до антрацитов. В Донецком бассейне преобладают угли с повышенной зольностью 12—18% (для всех марок выше Г). Для каменных углей и антрацитов характерно понижение ρ с повышением углефикации, хотя в этом же направлении происходит уменьшение внутренней влажности [Топорец, 1961]. Наиболее резкое уменьшение ρ наблюдается для углей с содержанием углерода более 90%. В работе [Геология ..., 1963] приводятся значения ρ антрацитов (10—20 Ом · м) свит C_2^3 — C_2^5 в регионе, пересекаемом рассматриваемым профилем.

Обобщенной зависимости ρ угля от влажности построить не удастся, поскольку измерения на образцах не воспроизводят природных условий, а данные, полученные по каротажу, эпизодичны. Лабораторные опыты показывают, что влияние влажности существенно при температурах ниже 200 °С, а при температурах выше 500 °С незначительно понижает ρ угля [Агроскин, 1961]. В угле имеется система пор, трещин, каналов, сообщающихся с поверхностью всего массива. Вся эта система называется фильтрационным объемом. Понят-

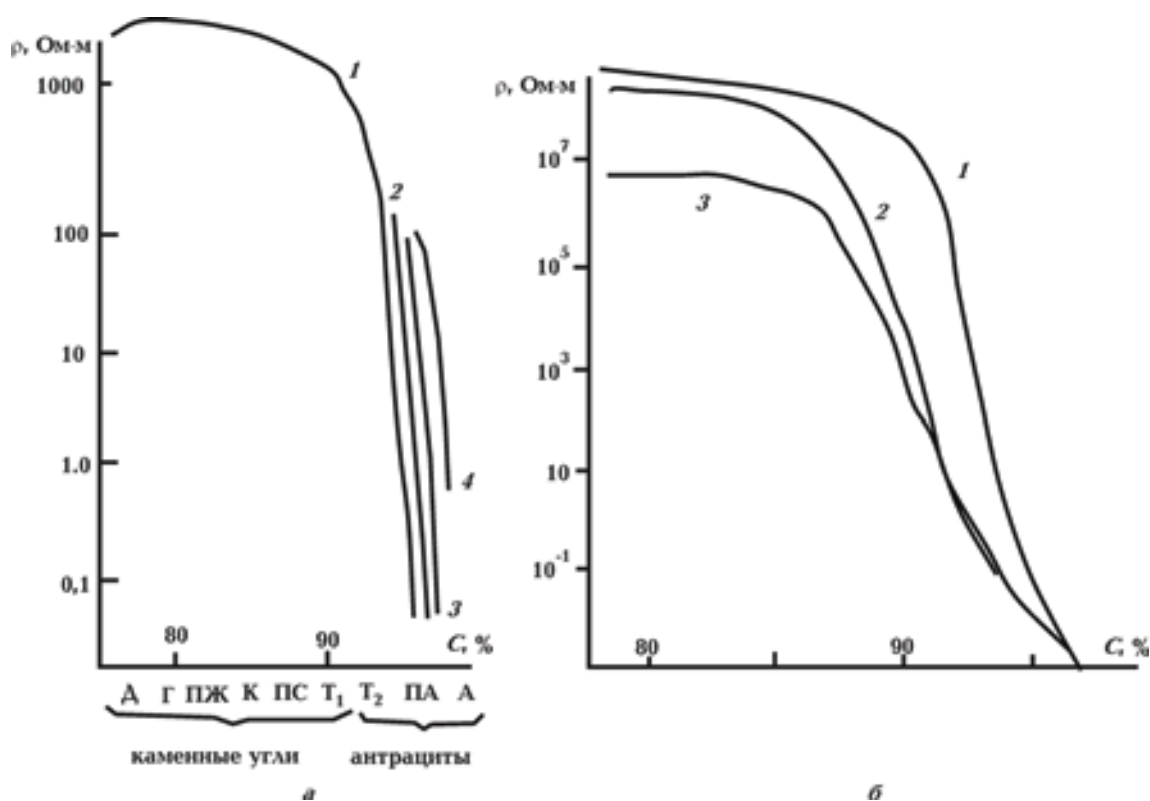


Рис. 7. Зависимость ρ различных марок угля, по [Петрофизика..., 1992] (а): 1 — обобщенная, 2 — малозольные, 3 — зольные, 4 — углистые сланцы и аргиллиты; б — зависимость ρ при региональном (1), термальном (2) и контактном (3) метаморфизме, по [Топорец, 1961].

но, что с повышением степени метаморфизма фильтрационный объем должен уменьшаться за счет уменьшения количества пор и трещин и соответственно воды.

Обогащение угленосных толщ газами должно приводить к повышению ρ . В Донбассе с глубиной метаносность углей уменьшается в 1,5 раз и более [Левенштейн, 1966, 1969; Булат и др., 2008]. Зона азотно-метановых или чисто метановых газов с приуроченными к ней гидрокарбонатно-натриевыми водами распространяется до глубины 650—750 м (р-н главной антиклинали Донбасса) и 300—400 м (Боково-Хрустальской и Чистяковской синеклиз) [Кравцов, 1969]. В каменных углях и антрацитах природные газы находятся преимущественно в адсорбированном состоянии (до 90 %). Главным фактором, определяющим сорбционную емкость угля, служит температура. "По-видимому, процесс сорбции прекращается при температуре 100—150 °С" [Косенко, 1969]. Следовательно, для углей выше марки ОС (температуры образования этих углей больше 150 °С) содержание газов должно оказывать пренебрежимо малое влияние на ρ .

На основании проведенных результатов, для объяснения значений ρ , полученных для объектов О1 и О2, необходимо предположить существенную углефикацию пород в районах объектов. Основанием для такого вывода могут служить зависимости V_p и ρ от углефикации [Топорец, 1985], согласно которым скорости V_p более 4 км/с соответствуют ρ углей порядка 0,01 Ом·м.

Выводы. Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. На исследуемом профиле выявлены аномальные объекты пониженного сопротивления в пределах Донбасса, Приазовского и Воронежского массивов. На Приазовском массиве ОПС располагается как в низах земной коры, так и в верхней мантии.

2. Наиболее мощные по своим параметрам ОПС находятся южнее зоны мелкой складчатости Донбасса. Именно эти объекты объясняют аномальное поведение МТ поля, которое было названо Донбасской аномалией электропроводности. По глубине большая часть этих ОПС располагается в осадочных породах. Объект О4 пространственно согласуется с Краснорецким разломом.

3. Для объяснения природы полученных ОПС недостаточно существующих представлений об объемах углеродсодержащих пород. Объяснить природу аномалий может помочь наличие флюидов. Для подтверждения этого предположения

следует привлечь результаты геотермических исследований.

4. Для подтверждения выделения ОПС в верхней мантии необходимо продолжить исследования вдоль профиля на северо-восток.

Список литературы

- Агроскин А. А. Физические свойства угля. Москва: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961. 308 с.
- Александров А. Л., Гордиенко В. В., Деревская Е. И., Земсков Г. А., Иванов А. П., Панов Б. С., Шумлянский В. А., Элов О. Г. Глубинное строение, эволюция флюидно-магматических систем и перспективы эндогенной золотоносности юго-восточной части Украинского Донбасса. Киев: Изд-во ИФИ Укр. науч. ассоц., 1996. 74 с.
- Булат А. Ф., Звягельский Е. Л., Лукинов В. В., Перепелица В. Г., Пимоненко Л. И., Шевелев Г. А. Углепородный массив Донбасса как гетерогенная среда. Киев: Наук. думка, 2008. 411 с.
- Гаркаленко И. А. Районирование Большого Донбасса по физическим свойствам. *Геофиз. сб.* 1988. № 24. С. 51—60.
- Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 1. Москва: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1963. 121 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). Киев: Корвін пресс, 2005. 210 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Украинские Карпаты (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2011. 128 с.
- Гречухин В. В. Закономерности регионального метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород. *Советская геология.* 1971. № 5. С. 21—37.
- Гречухин В. В. Изучение угленосных формаций геофизическими методами. Москва: Недра, 1980. 360 с.
- Гречухин В. В., Воевода Б. И., Дараган В. Н., Савченко А. В., Иванов Л. А. Петрофизические исследования угленосных отложений Донецкого бассейна. *Советская геология.* 1985. № 11. С. 89—101.
- Гречухин В. В., Дараган В. Н., Савченко А. В., Иванов Л. А., Лишин В. П., Пашков А. Е., Пашкова З. Г. Литологические и петрофизические исследования угленосных отложений в Западном Донбассе. *Советская геология.* 1992. № 4. С. 65—71.
- Евдошук Н. И., Омельченко В. Д., Галко Т. Н. Геотектоника и перспективы нефтегазоносности Донбасса. Киев: УкрДГРІ, 2002. 89 с.
- Ильченко Т. В. Скоростная модель осадочной толщи Донецкого прогиба вдоль профиля Константиновка—Сватово. *Геофиз. журн.* 1990. Т. 12. № 3. С. 67—72.
- Ингерев А. И. Результаты изучения кристаллического фундамента Украинского щита электромагнитными зондированиями: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Днепропетровск, 1989. 16 с.
- Ингерев А. И., Бугримов Л. П., Рокитянский И. И., Колдунов А. А. Результаты региональных исследований МТЗ вдоль геотраверсов Ужгород—Ворошиловоград и Армашат—Ахалцихе с целью изучения глубинного строения земной коры. Киев: Геоинформ, 1990. 275 с.
- Косенко Б. М. Изменение содержания метана и высших углеводородов в каменных углях и антрацитах Донбасса. В кн.: *Геология угольных бассейнов.* Т. 1. Москва: Наука, 1969. С. 124—128.
- Кравцов А. И. Геология и геохимия природных газов угольных месторождений. В кн.: *Геология угольных бассейнов.* Т. 1. Москва: Наука, 1969, С. 129—138.
- Левенштейн М. Л. Закономерности метаморфизма углей Донецкого бассейна: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев, 1966. 48 с.
- Левенштейн М. Л. Основные проблемы регионального метаморфизма углей. В кн.: *Геология угольных бассейнов.* Т. 1. Москва: Наука, 1969. С. 113—123.
- Логвинов И. М. Карта суммарной продольной проводимости осадочного чехла Днепровско-Донецкой впадины по результатам двумерного

- моделирования электромагнитных данных. *Физика Земли*. 2002. № 11. С. 94—96.
- Логвинов И. М., Лысенко Е. С. Геоэлектрическая модель тектоносферы вдоль геотраверса Приморск—Сватово. *Докл. НАН Украины*. 1995 № 10. С. 95—97.
- Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Гордиенко И. В. Результаты магнитотеллурических исследований на востоке Донбасса. *Доп. НАН України*. 2013. № 7. С. 96—101.
- Пашкевич И. К., Орлюк М. И., Лебедь Т. В. Магнитная неоднородность, разломная тектоника консолидированной земной коры и нефтегазоносность Днепровско-Донецкого авлакогена. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 1. С. 64—80.
- Петрофизика*: Справочник. Кн. 1. Горные породы и полезные ископаемые. Ред. Н. Б. Дортман. Москва: Недра, 1992. 391 с.
- Рокитянский И. И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 279 с.
- Рокитянский И. И., Ингеров А. И., Байсарович М. Н., Дзюба К. И., Жамалетдинов А. А., Лысенко Е. С., Попов В. М., Рокитянская Д. А., Шуман В. Н. Донбасская аномалия электропроводности. *Геофиз. журн.* 1989. Т. 11. № 3. С. 30—40.
- Рокитянский И. И., Ингеров А. И., Лысенко Е. С. Новые данные о Донбасской аномалии электропроводности. *Геофиз. журн.* 1994. Т. 16. № 1. С. 67—71.
- Рокитянский И. И., Лысенко Е. С., Рокитянская Д. А. Аномалия геомагнитных вариаций в Донбассе. *Докл. АН Украины*. 1988. № 7. С. 12—15.
- Топорец С. А. О влиянии метаморфизма на электрические и упругие свойства ископаемых углей. *Докл. АН СССР*. 1961. Т. 140. № 2. С. 451—454.
- Топорец С. А. Анализ основных концепций угольной петрофизики. В кн.: *Угленосные формации и петрология углей*. Ленинград: Недра, 1985. С. 91—97.
- Шумилова О. Л. Основные геологические факторы, влияющие на формирование показателей качества углей (на примере Нюрингринского угольного месторождения). *Изв. Томск. техн. ун-та*, 2006. Т. 309. № 4. С. 47—51.
- Ilchenko T. V., Stepanenko V. M., 1998. A velocity model of the Earth's crust and upper mantle of the Donbass and its geological interpretation. *Geophys. J.* 18, 383—399.
- Siripunvaraporn W., Egbert G., 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2D magnetotelluric data. *Geophysics* 65 (3), 791—803.
- Semenov V. Yu., Pek J., Adam A., Jozwiak W., Ladanvsky B., Logvinov I., Pushkarev P., Vozar J., 2008. Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project. *Acta Geophysica* 56 (4), 957—981.
- Varentsov Iv. M., 2007. Joint robust inversion of MT and MV data. In: *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40)*. Elsevier, 189—222.

Goelectrical model of the crust and upper mantle along DSS profile Novoazovsk—Titovka across the Donbas

© I. M. Logvinov, V. N. Tarasov, 2015

The results of interpretation of magnetotelluric data, focused on the along DSS profile Novoazovsk—Titovka by the two-dimensional inversion have been presented. On the territory of Donbass allocated 2 properties of low resistance (conductivity anomaly causing Donbass) occurring: in the southern part of the sediment (at a depth of 1—10 km), in the central part (at a depth of 1—18 km) in sedimentary rocks and penetrating into consolidated crust. Total cumulative integral conductivity objects about $3 \cdot 10^8$ S · m. The most reliable object spatially correlates with the coal-bearing rocks of the Carboniferous.

Key words: electrical conductivity, crust and mantle, Donbas.

References

- Agroskin A.A.*, 1961. Physical properties of the coal. Moscow: State Scientific and Engineering Publ. House of literature on ferrous and non-ferrous metallurgy, 308 p. (in Russian).
- Alexandrov A.L., Gordienko V.V., Derevskaya E.I., Zemskov G.A., Ivanov A.P., Panov B.S., Shumlyanskiy V.A., Epov O.G.*, 1996. Deep structure, the evolution of fluid-magmatic systems and the endogenous prospects of gold mineralization southeastern part of the Ukrainian Donbass. Kiev: Publ. House of the Institute of Fundamental Studies Ukrainian Scientific Association Publishing House of the Institute of Fundamental Studies Ukrainian Scientific Association, 74 p. (in Russian).
- Bulat A.F., Zvyagilskiy E.L., Lukinov V.V., Perepelitsa V.G., Pimonenko L.I., Shevelev G.A.*, 2008. Donbass coal containing an array as a heterogeneous environment. Kiev: Naukova Dumka, 411 p. (in Russian).
- Garkalenko I.A.*, 1988. Zoning Greater Donbass physical properties. *Geofizicheskiy sbornik* (24), 51—60 (in Russian).
- Geology of coal and oil shale USSR, 1963. Vol. 1. Moscow: State Scientific and Engineering Publ. House of literature on geology and subsoil protection, 121 p. (in Russian).
- Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnyaya O.V., Kovachikova S., Logvinov I.M., Tarasov V.N., Usenko O.V.*, 2005. Ukrainian shield (geophysics, deep processes). Kiev: Korvin press, 210 p. (in Russian).
- Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnyaya O.V., Kovachikova S., Logvinov I.M., Tarasov V.N., Usenko O.V.*, 2011. Ukrainian Carpathians (geophysics, deep processes). Kiev: Logos, 128 p. (in Russian).
- Grechukhin V.V.*, 1971. Laws of regional metamorphism of coal and epigenetic host rocks. *Sovetskaya geologiya* (5), 21—37 (in Russian).
- Grechukhin V.V.*, 1980. Study of coal-bearing formations geophysical methods. Moscow: Nedra, 360 p. (in Russian).
- Grechukhin V.V., Voevoda B.I., Daragan V.N., Savchenko A.V., Ivanov L.A.*, 1985. Petrophysical studies carboniferous deposits of the Donets Basin. *Sovetskaya geologiya* (11), 89—101 (in Russian).
- Grechukhin V.V., Daragan V.N., Savchenko A.V., Ivanov L.A., Lishin V.P., Pashkov A.E., Pashkova Z.G.*, 1992. Lithological and petrophysical studies carbonaceous deposits in Western Donbass. *Sovetskaya geologiya* (4), 65—71 (in Russian).
- Evdoshchuk N.I., Omelchenko V.D., Galko T.N.*, 2002. Geotectonics and petroleum potential of the Donbass. Kiev: UkrDGRI, 89 p.
- Ilichenko T.V.*, 1990. Velocity model of sedimentary strata Donetsk deflection along the profile Kostiantynivka—Svatovo. *Geofizicheskiy zhurnal* 12 (3), 67—72 (in Russian).
- Ingerov A.I.*, 1989. Results of the study of the crystalline basement of the Ukrainian shield electromagnetic sounding. Abstract of PhD thesis. geol. and min. sci. Dnepropetrovsk, 16 p. (in Russian).
- Ingerov A.I., Bugrimov L.P., Rokityanskiy I.I., Koldunov A.A.*, 1990. Regional research results MTS along geotraverses Uzhgorod—Voroshilovograd and Armashat—Akhhaltsikhe to study the deep crustal structure. Kiev: Geoinform, 275 p. (in Russian).
- Kosenko B.M.*, 1969. Changes in the content of methane and higher hydrocarbons in coals and anthracite Donbassa. In: *Geology coalfields*. Vol. 1. Moscow: Nauka, 124—128 (in Russian).
- Kravtsov A.I.*, 1969. Geology and geochemistry of natural gases of coal geology mestorozhdeniy. In: *Geology coalfields*. Vol. 1. Moscow: Nauka, 129—138 (in Russian).
- Levenstein M.L.*, 1966. Regularities of coal metamorphism of the Donets Basin. Abstract of PhD thesis. geol. and min. sci. Kiev, 48 p. (in Russian).
- Levenstein M.L.*, 1969. The main problems of regional metamorphism of coal. In: *Geology of coal basins*. Vol. 1. Moscow: Nauka, 113—123 (in Russian).
- Logvinov I.M.*, 2002. Map of the total longitudinal conductivity of the sedimentary cover of the Dnieper-Donets Basin on the results of the two-dimensional simulation of electromagnetic data. *Fizika zemli* (11), 94—96 (in Russian).
- Logvinov I.M., Lysenko E.S.*, 1995. Geoelectric model along tectonosphere geotraverse Primorsk—Svatovo. *Doklady NAN Ukrainy* (10), 95—97 (in Russian).
- Logvinov I.M., Tarasov V.N., Gordienko I.V.*, 2013. The results of the magnetotelluric studies in eastern Donbass. *Dopovidy NAN Ukrainy* (7), 96—101 (in Russian).
- Pashkevich I.K., Orlyuk M.I., Lebed T.V.*, 2014. Magnetic data, fault tectonics of consolidated earth crust and oil-and-gas content of the Dnieper-Donets avlakogen. *Geofizicheskiy zhurnal* 36 (1), 64—80 (in Russian).
- Petrophysics: A Handbook. Book 1. Rocks and minerals, 1992. Ed. N.B. Dortman. Moscow: Nedra, 391 p. (in Russian).
- Rokityanskiy I.I.*, 1975. Study abnormalities con-

- ductivity method magnetovariational profiling. Kiev: Naukova Dumka, 279 p. (in Russian).
- Rokityanskiy I.I., Ingerov A.I., Baysarovich M.N., Dzyuba K.I., Zhamaletdinov A.A., Lysenko E.S., Popov V.M., Rokityanskaya D.A., Shuman V.N., 1989. Donbass conductivity anomaly. *Geofizicheskiy zhurnal* 11 (3), 30—40 (in Russian).
- Rokityanskiy I.I., Ingerov A.I., Lysenko E.S., 1994. New data on the Donbass conductivity anomaly. *Geofizicheskiy zhurnal* 16 (1), 67—71 (in Russian).
- Rokityanskiy I.I., Lysenko E.S., Rokityanskaya D.A., 1988. Anomaly of geomagnetic variations in the Donbass. *Doklady NAN Ukrainy* (7), 12—15 (in Russian).
- Toporets S.A., 1961. On the effect of metamorphism on the electrical and elastic properties of coals. *Doklady AN SSSR* 140 (2), 451—454 (in Russian).
- Toporets S.A., 1985. Analysis of the basic concepts of coal petrophysics. In: *Coal-bearing formations and coal petrology*. Leningrad: Nedra, 91—97.
- Shumilova O.L., 2006. Main geological factors influencing the formation of coal quality parameters (for example Nyuringrinskogo coalfield). *Izvestiya Tomskogo tekhnicheskogo universiteta* 309 (4), 47—51 (in Russian).
- Ilchenko T.V., Stepanenko V.M., 1998. A velocity model of the Earth's crust and upper mantle of the Donbass and its geological interpretation. *Geophys. J.* 18, 383—399.
- Siripunvaraporn W., Egbert G., 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2D magnetotelluric data. *Geophysics* 65 (3), 791—803.
- Semenov V. Yu., Pek J., Adam A., Jozwiak W., Ladanvskyy B., Logvinov I., Pushkarev P., Vozar J., 2008. Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project. *Acta Geophysica* 56 (4), 957—981.
- Varentsov I.V., 2007. Joint robust inversion of MT and MV data. In: *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40)*. Elsevier, 189—222.