

К исследованию глубины залегания Карпатской аномалии электропроводности

© *И. И. Рокитянский, В. И. Бабак, А. В. Терешин, 2014*

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 11 марта 2014 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Карпатська аномалія електропровідності (КАЕ) була виявлена в 1960-их і інтенсивно досліджувалася як окремими інститутами, так і в рамках міжнародних проектів багатьох країн, але без єдиного стратегічного плану, який повинен ґрунтуватися на визначенні мети дослідження, можливостях використовуваних методів (МВП і МТЗ) і правилах їх взаємодії. Наведено основні результати дослідження КАЕ: побудова векторів індукції в більш ніж 1000 пунктах, нанесення аномалії на карту, оцінка методами МВП максимально можливої глибини залягання центру аномальних струмів і сумарної поздовжньої провідності аномального тіла. Справжня глибина верхньої кромки аномалії визначена методом МТЗ тільки на небагатьох перетинах, причому роботи були виконані 25—40 років тому. Метою майбутніх досліджень КАЕ має бути вивчення її природи (флюїди або електропровідні мінерали) і перспектив практичного використання (корисні копалини, геотермічна енергія та ін.). Першим кроком на цьому шляху має бути виконання МТЗ (і/або інших зондувань) над віссю КАЕ з метою вибору місць для буріння.

Ключові слова: карпатська аномалія електропровідності, магнітотелуричне зондування, магнітоваріаційне профілювання, вектор індукції Візе, горизонтальний магнітний тензор.

Введение. В земной коре находится большое количество аномалий электропроводности различного масштаба. Они обнаружены и изучались преимущественно методом магнитовариационного профилирования (МВП). Методом теллурического зондирования (МТЗ) выполнялись в ограниченном числе пунктов, поэтому глубина залегания верхней кромки аномалий остается неизученной.

О природе аномалий существуют две основные гипотезы: 1) флюидная — ионопроводящие аномалии: расплавы, включая частичные, и минерализованные воды; 2) электропроводящая: углеродистые образования, включая тонкие пленки, угли, углистые сланцы, сульфиды, самородные металлы и руды. Многие из перечисленных объектов представляют интерес как полезные ископаемые, технические и лечебные воды, источники геотермической энергии, а аномалии геомагнитных вариаций могут являться

экологическим фактором, влияющим на микроклимат, частоту гроз и количество осадков, развитие и самочувствие живых существ.

Природа коровых аномалий, даже давно открытых Карпатской, Кировоградской, Трансданубской (Венгрия), Московско-Тамбовской, Ладужской и других, остается неопределенной. Для ее выяснения первым делом необходимо определить глубину верхней кромки аномалии вдоль всей ее длины. На наиболее приподнятых участках аномалии можно рекомендовать детальные работы комплексом методов для выбора места бурения скважин.

Таким образом, одной из приоритетных задач глубинной геоэлектрики на ближайшие годы следует считать выполнение электромагнитных наблюдений над осевой зоной вытянутых аномалий электропроводности (изученных преимущественно с помощью векторов индукции) с упором на МТЗ и магнитный тензор.

В более чем 1000 пунктах Карпат построены векторы индукции, прослежено положение оси аномалии, оценена методами МВП максимально возможная глубина залегания центра аномальных токов и суммарная продольная проводимость. Но истинная глубина верхней кромки аномалии определена методом МТЗ только на немногих пересечениях, причем работы были выполнены 25—40 лет тому назад. Строение аномалии на этих пересечениях получилось существенно различным [Praus, 1971; Рокитянский, Ингероу, 1999; Stanika et al., 1999].

Карпатской аномалии электропроводности посвящено большое количество публикаций, измеряемое сотнями. По содержанию их можно разделить на три группы: 1) данные полевых измерений; 2) достоверная интерпретация в рамках инвариантов обратной задачи, когда полученные параметры геоэлектрической структуры с необходимостью следуют из измеренных данных; 3) моделирование, когда ищется одна или несколько геоэлектрических моделей, содержащих параметры, не следующие с необходимостью из измеренных данных. Таких моделей, удовлетворяющих данным в пределах их неопределенности, можно построить великое множество, но они не приводят к увеличению знаний об объекте исследования [Рокитянский, 1981, 2012]. Поэтому большинство работ по моделированию Карпатской аномалии здесь не рассматривается.

Настоящая статья не является обзором. В ней представлены достоверные данные МВП о местоположении аномалии и некоторые количественные оценки ее параметров по данным МВП. Наиболее важный вывод (для возможного в будущем практического использования аномалии) — глубину залегания верхней кромки метод МВП практически не может определить, что подтверждают работы, выполненные в Померании. Будут представлены имеющиеся данные МТЗ над осевой зоной Карпатской аномалии электропроводности (КАЭ).

Результаты МВП. В конце 1950-х гг. Хорст Визе ввел названные его именем векторы индукции C_w [Wiese, 1965]. Они определяются соотношением трех компонент геомагнитных вариаций в одной точке наблюдения и характеризуют неоднородность распределения индуцированных в Земле электрических токов, а следовательно, и неоднородность распределения электропроводности. Векторы Визе направлены от проводника перпендикулярно направлению избыточных токов в нем. Визе опубликовал 120 векторов по полевым и об-

серваторским наблюдениям геомагнитных вариаций в Восточной Германии, Польше, Чехословакии, Венгрии, Румынии, Болгарии. На рис. 1 представлен монтаж полученных им векторов в Карпатском регионе. В Западных и Южных Карпатах Визе зафиксировал смену направлений векторов индукции на 180° , т. е. фактически обнаружил Карпатскую аномалию электропроводности. Однако он интерпретировал аномалию в Карпатах как часть Северо-Германской аномалии, объясняя их единым вихревым током в проводящей петле на глубине 150—200 км. В начале 60-х годов прошлого столетия Янковский выполнил геомагнитные наблюдения в 25 пунктах на территории Польши и обнаружил аномалию геомагнитных вариаций в Восточных Карпатах, которую объяснил мощными отложениями хорошо проводящих осадочных пород на границе Восточно-Европейской платформы и альпийских структур Карпат [Jankowski, 1965]. На территории Украины большие работы были выполнены Львовским филиалом Института геофизики под руководством А. П. Бондаренко [Бондаренко и др., 1972]. В этой работе представлены как векторы Визе, так и профильные графики горизонтальной и вертикальной геомагнитных компонент бухтообразных вариаций, а также графики электрического поля — все с нормировкой к обсерватории "Корец" на Украинском щите (рис. 2). Особенно уникален график электрического поля, согласно которому горизонтальное электрическое поле в районе Карпатской аномалии не убывает, как можно ожидать над проводником, а наоборот, возрастает. Полученные позже кривые МТЗ над осью аномалии подтвердили этот результат.

В последующие годы индукционные исследования методом МВП интенсивно развивались в Центральной и Восточной Европе, и к началу 70-х годов в Венгрии было построено еще 28 векторов Визе [Adam et al., 1972], на Украине — 94 [Бондаренко и др., 1972; Rokityansky et al., 1975], в Румынии — 119 [Calota et al., 1971]. В работах [Рокитянский, 1972, 1975] Карпатская аномалия представлена в виде погребенного локально квазидвумерного тела, простирающегося вдоль всей дуги Карпат. В этих работах дана также физическая модель формирования аномалий геомагнитных вариаций на проводящих телах. Ее отличие от более ранних моделей состоит в учете проводимости вмещающей среды, что для погребенного цилиндра означает учет нулевого члена ряда, так называемой аномалии электрического (кон-

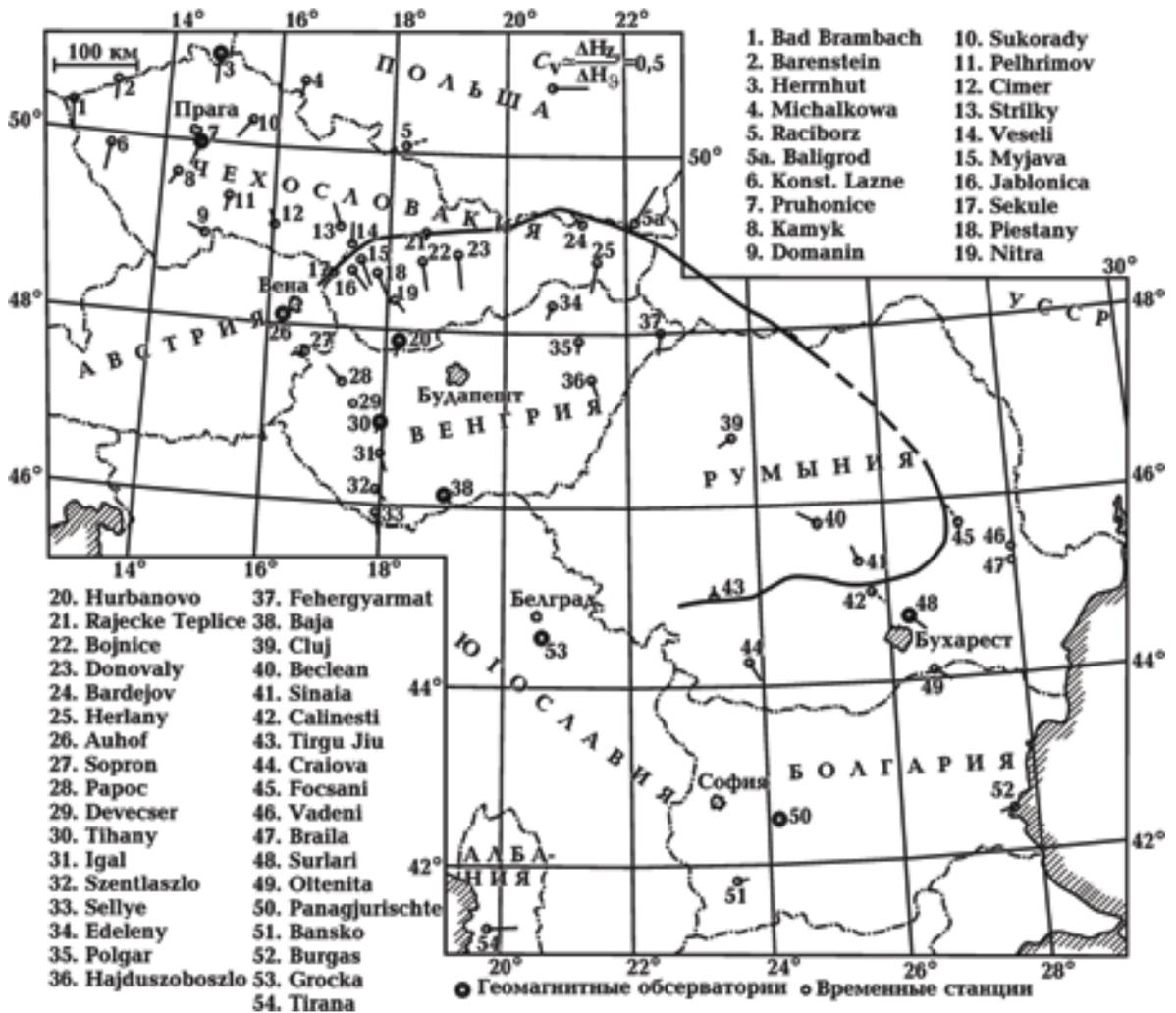


Рис. 1. Векторы Визе в Карпатском регионе [Wiese, 1965]. Ось Карпатской аномалии проведена авторами.

дуктивного) типа, которая оказалась основной.

В 70-е годы прошлого столетия были проведены обстоятельные совместные польско-чехословацкие исследования по 8 профилям методом МВП [Jankowski et al., 1985]. Кроме построения векторов Визе для каждого профиля синхронных наблюдений было выполнено разделение поля на внутреннюю и внешнюю части по формулам Кертца и определено положение эквивалентного линейного тока, глубина которого для каждого из профилей (с запада на восток) получилась равной 24, 16, 19, 18, 18, 24, 26, 21 км. Следует подчеркнуть, что эти цифры являются оценкой максимально возможной глубины h_{\max} залегания центра аномальных токов. Реальные токи и сама аномалия электропроводности могут располагаться как на этой глубине, так и на любой меньшей, вплоть до нуля, так как данные МВП практически не несут информации об истинной глу-

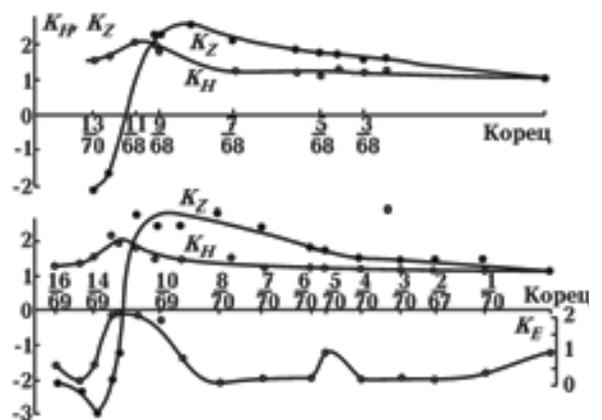


Рис. 2. Относительные интенсивности вертикальной $K_z = B_z$, горизонтальной $K_H = (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$ и электрической $K_E = (E_x^2 + E_y^2)^{1/2}$ компонент бухтообразных вариаций с периодами $T = 15 \div 60$ мин (в среднем 1800 с) вдоль профилей Рахов — Корец (Украинский щит) и Берегово (Закарпатье) — Корец, нормированные к соответствующим компонентам на обсерватории "Корец" [Бондаренко и др., 1972].

бине аномалии. К началу 1980-х годов определенный этап исследования Карпат методом МВП был завершен. Адам и Валнер построили карту векторов Визе региона [Adam, Walner, 1981], которая с незначительными изменениями и дополнениями авторов представлена на рис. 3. Эта карта хорошо отражает и современное состояние изученности региона методом МВП. В последние 20 лет на Карпатах выполнено небольшое количество новых наблюдений, причем некоторые из них недоступны, поскольку отдельные авторы и организации "засекречивают" данные наблюдений.

Резюмируем изученность Карпатской аномалии методом МВП. Западные и Восточные Карпаты на территории Чехословакии, Польши и Украины покрыты сетью профилей с синхронными наблюдениями. Расстояние между

пунктами наблюдения на профилях порядка 10 км и между профилями 30—50 км позволяет трассировать ось аномалии с погрешностью 2—5 км на профилях и до 10 км между профилями. При этом используются как векторы индукции, так и синхронные наблюдения. В целом на этой территории геометрические параметры аномалии геомагнитных вариаций носят простой квазидвумерный характер. В Румынии пункты наблюдений удалены друг от друга на 20—50 км, в этих условиях погрешность проведения оси аномалии составляет 10—25 км. На двух участках в районе сочленения Восточных и Южных Карпат (зона Вранча) векторы ведут себя противоречиво, что может быть обусловлено сложным геоэлектрическим строением или погрешностью измерений. Следует иметь в виду и изменчивость векторов Визе

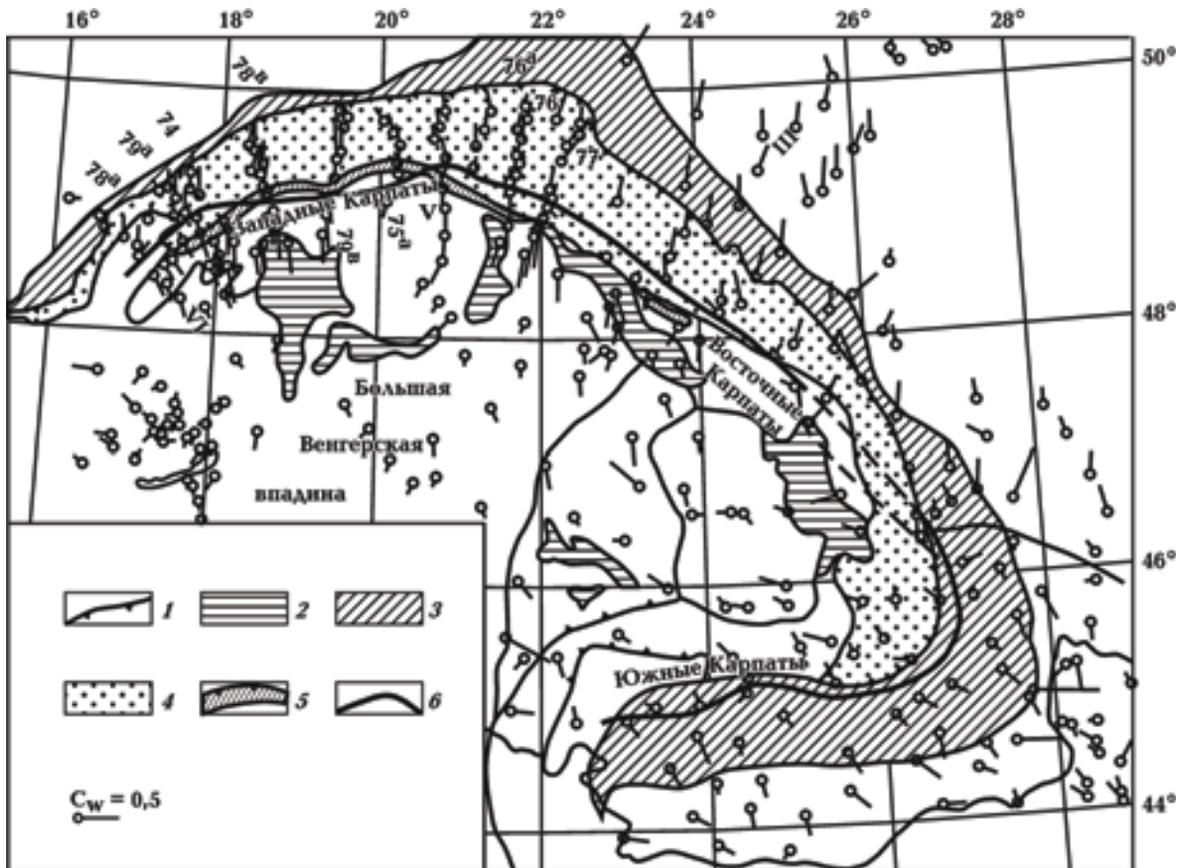


Рис. 3. Векторы индукции Визе C_w или реальные векторы C_u на периоде 1800 с (интервал 900—3600 с) и Карпатская аномалия электропроводности на тектонической схеме региона: 1 — главные границы и разломы (надвиги) региональных структур; 2 — выходы неогеновых вулканических пород; 3 — Предкарпатский прогиб; 4 — Внешние (флишевые) Карпаты; 5 — Пиеннинский и Мармарошский утесовый пояс; 6 — ось Карпатской аномалии электропроводности. Профили синхронных наблюдений МВП обозначены двумя цифрами, дающими год наблюдений, римские цифры — номера международных геотраверсов.

во времени [Харин, 1981], особенно заметную в тектонически активных регионах при подготовке землетрясений, интенсивных в этом районе. На рис. 3 Карпатская аномалия в зоне Вранча и севернее от нее проведена предположительно двумя прерывистыми линиями или с разрывом [Stanika et al., 1999 и др.]: южная часть смещена от северной на 100 км к востоку.

Графики изменения проекции вектора Визе на профили, ортогональные простиранию Карпатской аномалии электропроводности, опубликованы в ряде работ, в частности [Рокитянский, Ингеро́в, 1999]. На профилях Западных и Северных Карпат наблюдается асимметрия кривых — северная ветвь ниже южной. Первой причиной асимметрии является наложение аномального поля от Северо-Германско-Польской аномалии геомагнитных вариаций, расположенной севернее, и от Мораво-Силезской аномалии, расположенной северо-западнее. Второй причиной является асимметрия прилегающих осадочных образований, более проводящих севернее аномалии в Предкарпатском прогибе. На юго-востоке Польши в полосе 50—60 км производственными организациями выполнены сотни магнитотеллурических зондирований [Zytko, 1997; Stefaniuk et al., 2009], которые показали, что докембрийский фундамент погружается в южном направлении с 5—7 до 20 км. Суммарная продольная проводимость осадочных отложений, содержащих и слои угленосных образований, увеличивается от первых сотен в северной части до первых тысяч сименсов на южной границе выполненных работ. Подобный результат получен по данным МТЗ—МВП в Восточных Карпатах на Украине [Рокитянский, Ингеро́в, 1999]. На профилях Берегово — Корец, Рахов — Корец и Селятин — Черновцы в Украинских Карпатах аномальное поле, характеризуемое векторами Визе, убывает в северном направлении очень медленно, что, по-видимому, обусловлено двумя причинами: наложением аномальных полей от осадочных пород Предкарпатского прогиба и более проводящей астеносферой в юго-западной части профилей под Венгерской впадиной.

Трансформация векторов индукции. Представляет интерес опыт трансформации площадных данных о векторах индукции в горизонтальный тензор аномального магнитовариационного поля $[M]$ с последующим построением карты характерных элементов этого тензора, которая по замыслу авторов должна непосредственно

оптимальным образом картировать аномалию электропроводности [Wybraniec et al., 1999; Nowozynski, 2012; Jozwiak, 2013]. В базе данных Института геофизики Польской Академии наук собрано более 1000 векторов индукции (диапазон бухтообразных вариаций с периодами 15—60 мин) в Карпатском регионе и прилегающих территориях. Пространственно они распределены весьма неоднородно: наиболее плотно в Карпатах.

Для трансформации векторов в горизонтальный тензор используется трехмерное обобщение формулы Гильберта [Weaver, 1964; Рокитянский, 1975, с.74; Бердичевский, Дмитриев, 2009], в которой интегрирование вертикальной компоненты аномального поля, приближенно представляемой векторами индукции, записано в бесконечных (по горизонтальным координатам) пределах. Практически интегрирование в бесконечных пределах заменяется интегрированием по ограниченной площади, разбиваемой на прямоугольную сетку с $X \times Y$ ячейками. Для этого данные преобразуются путем сплайн-аппроксимации из неоднородных по площади в однородные так, чтобы каждая ячейка характеризовалась одним вектором индукции. В результате получаются значения тензора $[M]$ во всех ячейках, в том числе там, где не было наблюдений. Поэтому получаемые карты $[M]$ следует сравнивать с картами исходных векторов и придавать больший вес тем районам, где плотность векторов больше и их качество лучше. Тензор $[M]$ характеризуется восемью числами, и возникает вопрос как лучше представить его на карте, чтобы наглядно видеть распределение аномальной электропроводности. Распространенным способом является представление в виде эллипсов пертурбации, построенных по действительной части тензора [Pajunpaa et al., 2002; Varentsov et al., 2005]. Польские исследователи [Nowozynski, 2012; Jozwiak, 2012, 2013] использовали сингулярное разложение (Singular Value Decomposition — SVD) тензора. Сингулярные значения тензора λ_{\max} и λ_{\min} строятся по комплекснозначному тензору $[M]$ и инвариантны относительно измерительных осей, причем λ_{\max} наиболее четко характеризуют источник аномального поля — аномалию электропроводности. Карты этого скалярного действительного положительного параметра строятся для определенного периода. Повышенные значения λ_{\max} трассируют аномалии электропроводности со всех глубин, на которых возбуждаются аномальные токи на используемом периоде вариаций.

Результат такого построения для Карпатского региона представлен на рис. 4. Автор [Nowozynski, 2012] включил в планшет интегрирования значительные территории без наблюдений и некоторые сомнительные данные, которые невозможно проверить (он ставил задачей иллюстрацию методики, а не получение геологического результата). Тем не менее, аномалии $\lambda_{\max} > 1$ соответствуют известным аномалиям электропроводности, а величина λ_{\max} в первом приближении соответствует их известным параметрам. Карпатская аномалия выделяется наиболее уверенно и в хорошем согласии с другими построениями (см. рис. 6, а, г). Исключением является неинтенсивная "аномалия" 9 на рис. 4, где имеются высококачественные наблюдения, не зарегистрировавшие аномалию. Римскими цифрами даны пониженные значения λ_{\max} . Они соответствуют площадям, где коровые аномалии большого масштаба отсутствуют. Следует подчеркнуть, что все вышеприведенные карты векторов индукции и параметров горизонтального тензора относятся к интервалу периодов 15—60 мин (900—3600 с), в среднем 1800 с, к диапазону бухтообразных вариаций, которые до 1980-х годов регистрировались аналоговыми магнитометра-

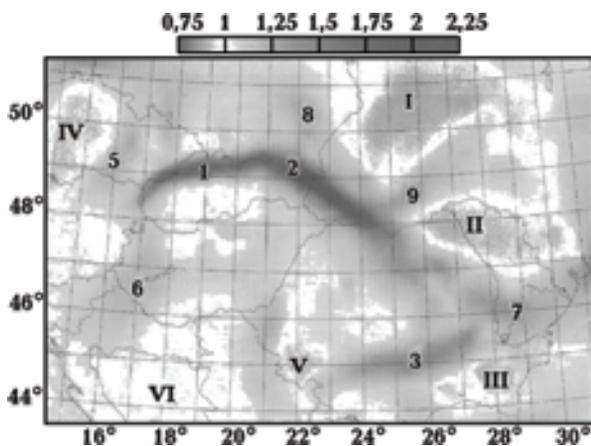


Рис. 4. Пространственное распределение инварианта λ_{\max} в Карпатском регионе [Nowozynski, 2012]. Аномалии повышенного λ_{\max} : 1 — Западные Карпаты, 2 — Восточные Карпаты, 3 — Южные Карпаты, 4 — Померания, 5 — Чешско-Моравский массив, 6 — Трансданубская или Средневенгерская аномалия, 7 — Черноморская ветвь Карпатской аномалии, 8 — аномалия в районе TESZ, 9 — аномалия, не подтвержденная другими данными. Зоны пониженного λ_{\max} даны римскими цифрами и соответствуют участкам с пониженной коровой проводимостью. В обширной зоне VI практически отсутствуют наблюдения.

ми, причем типичная длительность полевых измерений на каждом пункте составляла около месяца. Имея такой представительный материал в условиях меньших чем сейчас промышленных помех, удавалось получить достаточно точные значения векторов индукции и аномальных полей в горизонтальных координатах. Значительное количество векторов индукции получено без фазовой характеристики — это векторы Визе (C_W). Однако при правильном/удачном выборе периода для интерпретации этот недостаток может быть минимизирован. Аномальные поля от каждой аномалии электропроводности характеризуются своей частотной характеристикой, амплитуда которой на некотором периоде T_0 достигает максимума, а фаза переходит через нуль [Рокитянский, 1975]. Над Карпатской аномалией максимум аномального поля наблюдается в интервале периодов 1000—2000 с. Следовательно, выбор периода 1800 с для трансформации векторов в тензор $[M]$ является удачным, поскольку фаза векторов индукции невелика и пренебрежение ею при использовании векторов Визе не приведет к значительной погрешности. Положение максимума определяется масштабом аномалии; последний для двумерной аномалии определяется суммарной продольной проводимостью $G = \sigma Q$, где σ — средняя удельная электропроводность аномального тела, Q — площадь его поперечного сечения. Для двумерного тела G связано с T_0 приближенным эмпирическим соотношением $G [Cm \times m] = 5 \times 10^4 \{T_0 [c]\}^{1,2}$ [Rokityansky, 1982, с. 295]. МВ параметры на периодах десятки минут несут наиболее четко выраженную информацию об аномалиях масштаба $G = 10^8 \div 10^9 Cm \times m$ независимо от того, приповерхностная эта аномалия или глубинная в пределах литосферы.

При проведении наблюдений МВП в диапазоне более коротких периодов обнаруживается множество более мелких аномалий, что подтверждается практикой, например, на Украинском и Балтийском щитах. Рассмотрим пример в Польше из работ [Jozwiak, 2012, 2013]. На рис. 5 представлены исходные данные — векторы индукции на территории Польши и прилегающих стран. На рис. 6, а даны результаты их трансформации в горизонтальный тензор: аномальные проводники видны на юге и северо-западе Польши. На юге это Карпатская аномалия. Ее контур и интенсивность хорошо совпадают с другими интерпретациями, в частности с решением обратной задачи в рамках модели тонкого слоя [Kovachikova et al.,

2005]. На северо-западе вырисовываются две интенсивные аномалии проводника, приуроченные к Трансъевропейской шовной зоне (TESZ), предположительно состоящей из двух деформационных фронтов Каледонского (CDF) и Варисийского (VDF) возрастов. TESZ, по предположению тектонистов, простирается от Балтийского до Черного моря. Данные по электропроводности не дают убедительного подтверждения этой идеи: юго-восточнее Варисийского фронта аномалия проводимости выражена слабо.

На северо-западе Польши с выходом в Германию в 2003—2004 годах были выполнены наблюдения (90 длиннопериодных МТ и 60 АМТ) вдоль 2 региональных геотраверсов LT-7 и P2 (см. рис. 5) в рамках международного проекта "Померания". Вместе с обсерваторскими данными и дополнительными пунктами вокруг профилей были получены функции отклика МВП

и МТЗ в широком диапазоне периодов на площади примерно 300×300 км. Векторы индукции в работе [Jozwiak, 2013] были использованы для трансформации в карты λ_{\max} горизонтального тензора для периодов от 64 до 4096 с (рис. 6, б). Одновременно можно рассматривать результаты МТЗ (рис. 6, в), которые показывают известные хорошо проводящие осадочные бассейны и под ними два коровых проводника с глубиной верхней кромки порядка 10 км и суммарной продольной проводимостью до нескольких тысяч См. Карты λ_{\max} на коротких периодах "чувствуют" только поверхностные осадочные бассейны. С увеличением периода северная аномалия λ_{\max} растет и достигает в максимуме значения 2 на периоде порядка 1000 с, южная аномалия менее интенсивна по λ_{\max} , но достигает максимума на периоде порядка 2000 с. Утверждать, что южная аномалия имеет больший масштаб и суммарную продольную про-

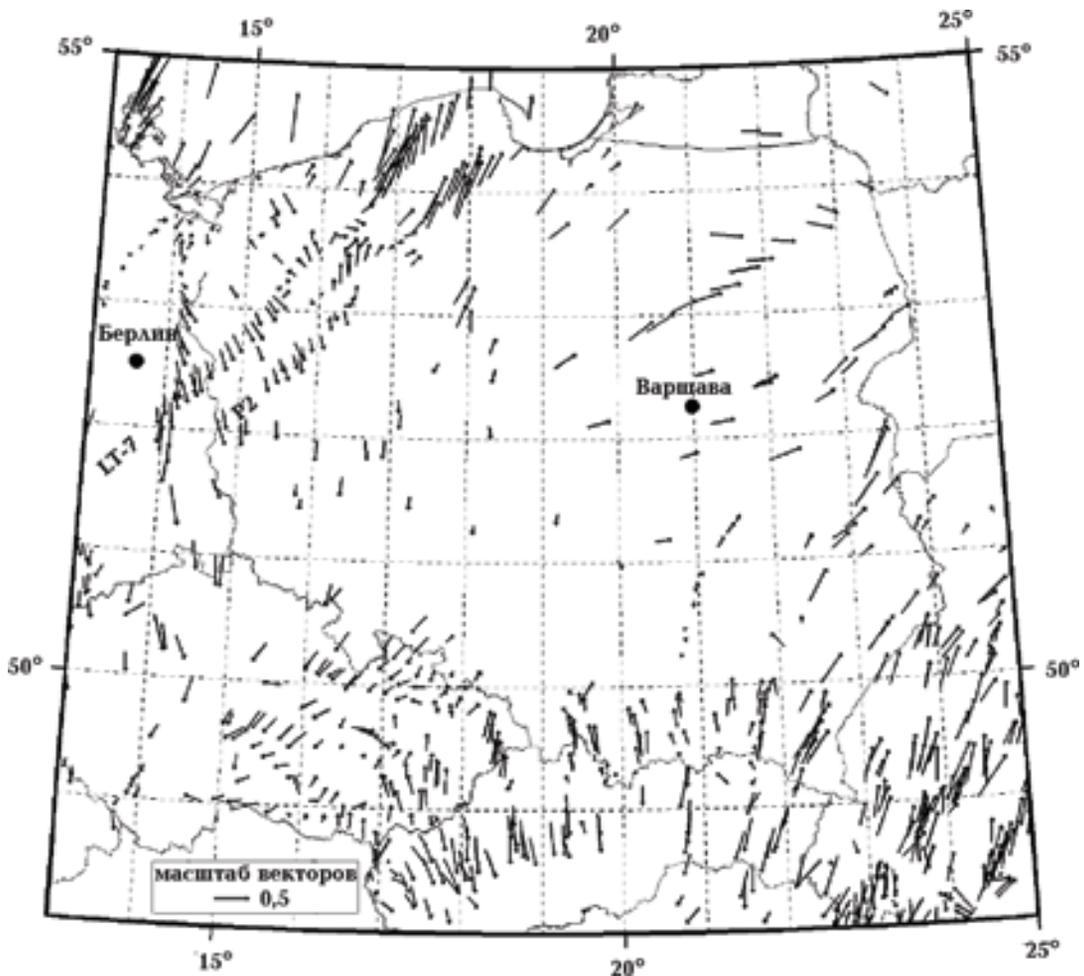


Рис. 5. Реальные векторы индукции для периода 1800 с на территории Польши и сопредельных стран [Jozwiak, 2012].

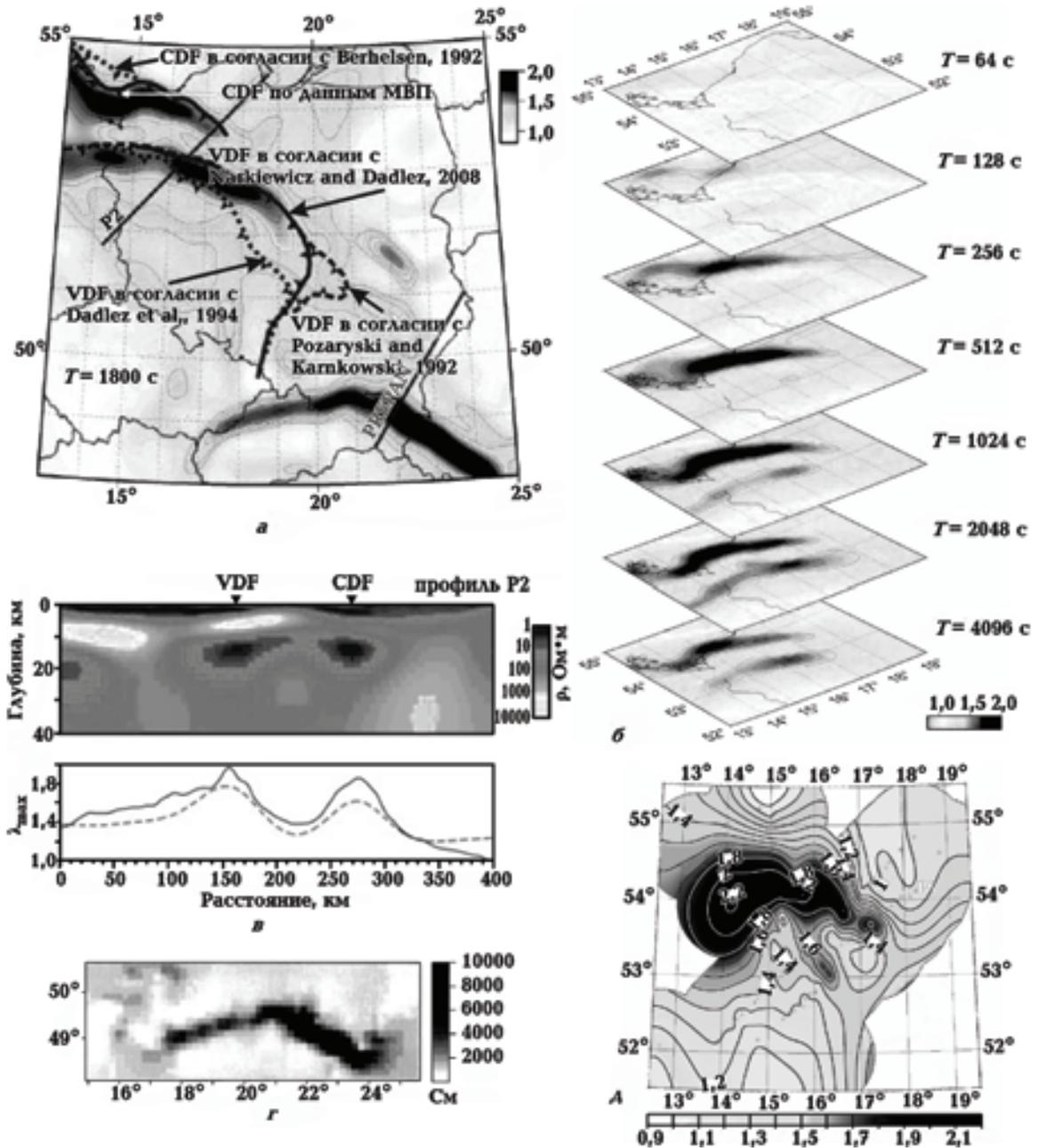


Рис. 6. Пространственное распределение инварианта λ_{\max} горизонтального магнитного тензора для периода 1800 с, полученного по векторам индукции, представленным на рис. 5, путем сплайн-аппроксимации и 2D преобразования Гильберта (а), CDF и VDF — деформационные фронты Каледонского и Вариссийского возрастов соответственно [Jozwiak, 2012, 2013]; б — пространственное распределение λ_{\max} горизонтального магнитного тензора в Померании для периодов от 64 до 4096 с; в — геоэлектрический разрез вдоль профиля P2 по результатам 2D инверсии всей совокупности EM данных на профиле. На нижнем графике λ_{\max} вдоль профиля P2: пунктирная линия — по 2D преобразованию Гильберта, сплошная линия — по 1D преобразованию Гильберта [Ernst et al., 2008; Jozwiak, 2012]; г — инверсия векторов индукции на периоде 32 мин в рамках модели тонкого слоя [Kovachikova et al., 2005]; д — карта максимальной амплитуды горизонтального магнитного тензора [M] для периода 1024 с в Померании на северо-западе Польши по синхронным наблюдениям относительно базисной точки P8 [Varentsov et al., 2005].

водимость G , по-видимому, нет оснований, поскольку исходные данные — векторы индукции “собирают” информацию со значительной

площади с резкими неоднородностями (севернее и западнее обеих аномалий), не учитываемыми при сплайн-аппроксимации. Последо-

вательный анализ аномалий λ_{\max} на всех периодах рис. 6, б показывает, что разделить вклад поверхностного и глубинного коровых проводников по данным МВП практически невозможно. На рис. 6, д показаны результаты синхронной (для части пунктов многоступенчатой с промежуточными базисами) обработки горизонтальных компонент геомагнитного поля. Эта карта заслуживает большего доверия по сравнению с пересчетами из векторов индукции.

МТЗ над осевой зоной Карпатской аномалии. Для формирования более обоснованных суждений о физико-химической природе аномалий электропроводности, ее геологической интерпретации и оценки перспектив практического использования принципиальное значение имеет определение истинной глубины залегания, что может быть выполнено методами зондирования МТЗ, ЧЗ, ЗС, ВЭЗ, ДЭЗ. МТЗ над осью КАЭ выполнены в трех странах: (Чехо) Словакии, Украине, Румынии. Рассмотрим их.

Словакия. Вдоль международного геотраверса VI (см. рис. 3) в конце 1960-х годов были вы-

полнены МТЗ с шагом 30—35 км. Один из пунктов попал на ось аномалии (рис. 7, а). Расхождение уровня и формы кривых МТЗ в различных азимутах здесь оказалось сравнительно небольшим, на периодах 25—150 с наблюдается нисходящий участок кривых МТЗ, по которому определяется проводящий слой на глубине 20 км с интегральной проводимостью порядка 1000 См. Коровый проводник на этой же глубине наблюдался и в других пунктах геотраверса VI [Praus, 1971]. Магнитовариационные данные в районе геотраверса VI свидетельствуют о протекании аномального тока в относительно узкой полосе (максимально возможные глубина 25 км, эффективная ширина 50 км) [Jankowski et al., 1985]. Магнитотеллурические данные в пунктах, расположенных с редким для окончательных выводов шагом, дают более широкий относительно изотропный проводник.

Украинские Карпаты. Первый автор еще в начале 1970-х годов рассматривал проведение зондирований над осью КАЭ как приоритетную задачу геоэлектрики, однако эта идея

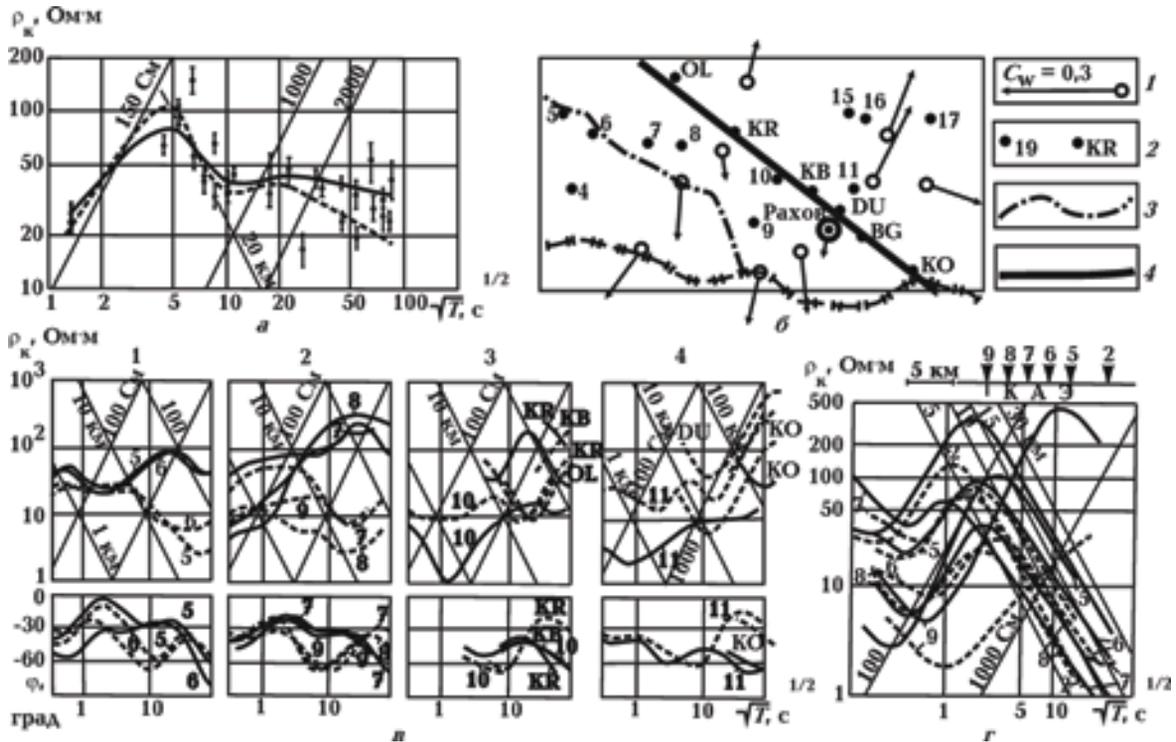


Рис. 7. Результаты МТЗ на Карпатской аномалии: а — Западные Карпаты, геотраверс VI [Praus, 1971], б — карта части Украинских Карпат (1 — пункты МВП и векторы Визе; 2 — пункты МТЗ, цифрами обозначены цифровые наблюдения ЦЭС-2, буквами — аналоговые наблюдения; 3 — Закарпатский глубинный разлом; 4 — ось КАЭ), в — кривые МТЗ на Украинских Карпатах [Рокитянский, Ингеров, 1999], г — кривые МТЗ над осевой зоной КАЭ в Румынии [Pinna et al., 1992]. Сплошные линии — поперечная поляризация, пунктир — продольная.

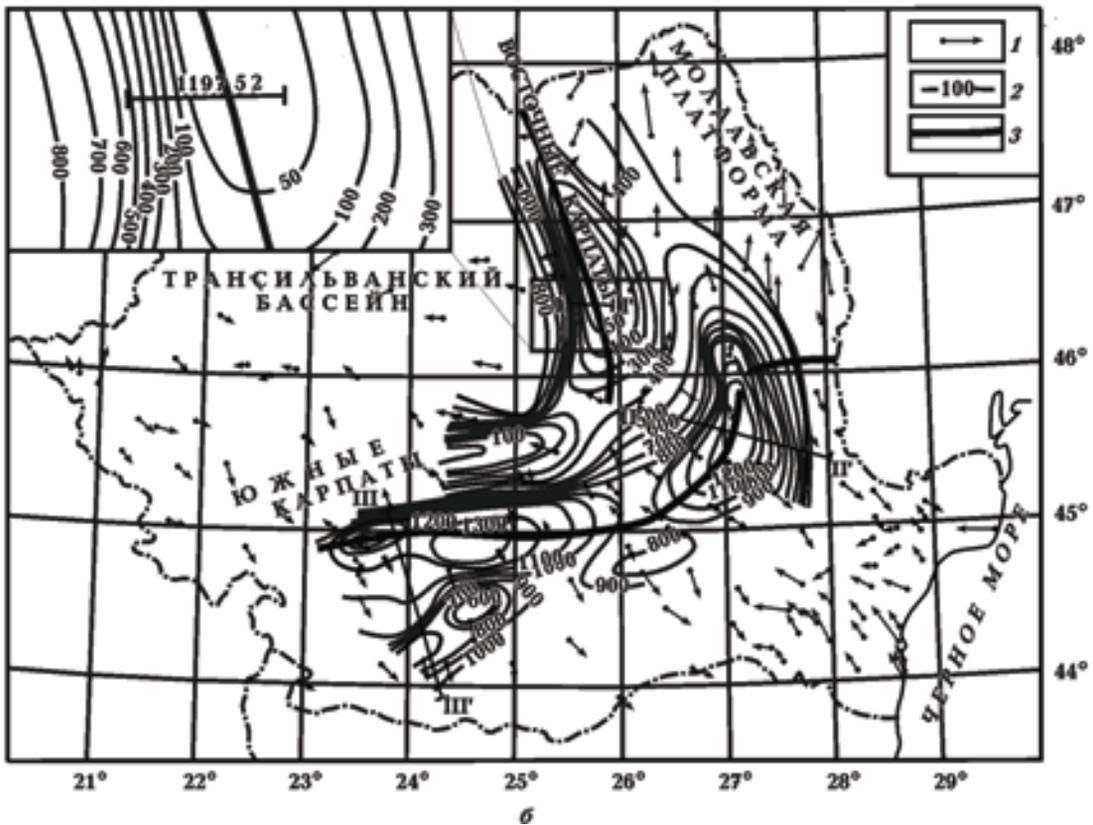
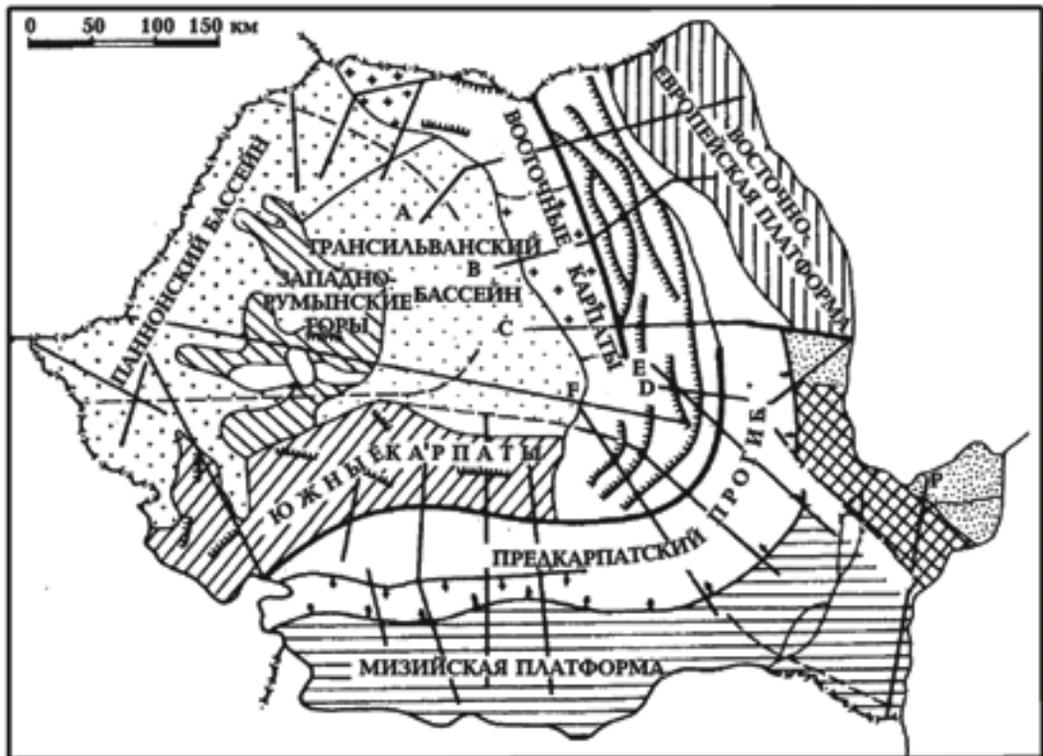


Рис. 8. Профили МТЗ на тектонической карте Румынии [Stanica et al., 1999] (а) и векторы Визе (б) для периодов 5—50 мин (1), изолинии суммарной продольной проводимости (в См) осадков по данным МТЗ (2) и ось КАЭ (3). На врезке сверху расположение детального профиля и пункты над осевой зоной КАЭ, кривые в которых даны на рис. 7, г. [Pinna et al., 1992].

не получила поддержки из-за трудности ее реализации. Ось аномалии проходит по горным Карпатам, характеризуемым развитым поперечным расчленением, глубокими узкими долинами ручьев и рек, крутыми сильно увлажненными склонами, слабо развитой сетью проезжих дорог.

Первые МТЗ в Украинских Карпатах были получены в 1973 и 1976 гг. аналоговой аппаратурой. Продольные кривые строились легко, поперечные имели значительный разброс. Оказалось, что в интервале периодов 50—2000 с продольные и поперечные кривые ведут себя зеркально противоположно: продольная кривая имеет глубокий минимум, а поперечная — высокий максимум, причем различие по ρ_k превышает порядок (рис. 7, в). Из практики магнитотеллурической обработки известно, что максимальные кривые обычно строятся легче и устойчивей. Над осью Карпатской аномалии наблюдается противоположная картина. Устойчивость продольной кривой объясняется устойчивостью тока в аномалии, который формируется на большой территории (эффект регионального сглаживания в "области значимости" [Рокитянский, 1975]), а неустойчивость поперечной кривой — локальным формированием электрического поля и его сильной зависимостью от поляризации вариаций. В 1987—1988 гг. были выполнены наблюдения цифровой аппаратурой, подтвердившие и дополнившие ранние результаты, все они описаны в работе [Рокитянский, Ингеро́в, 1999]. Анализ кривых показал их четко выраженную зональность, причем границы зон параллельны генеральному простиранию Карпат и ограничены в основном известными тектоническими границами. 30 кривых МТЗ сгруппированы по шести продольным зонам, из которых третья — от Закарпатского глубинного разлома до оси КАЭ — разделена на четыре подзоны, представленные на рис. 7, в. Продольные кривые МТЗ несут информацию о глубине корового проводника и его суммарной продольной проводимости, поперечные кривые почти не чувствуют корового проводника, т. е. последний является поперечно-прозрачным [Рокитянский, 1988]. По со-

вокупности 12 продольных кривых рис. 7, в определена средняя глубина верхней кромки основного проводящего тела КАЭ в юго-восточной части Украинских Карпат, равной 12 ± 4 км. В работе [Рокитянский, Ингеро́в, 1999] подобрана модель, удовлетворительно описывающая всю совокупность данных МВП—МТЗ.

Румыния. МТЗ выполнялись с конца 1970-х до 1990-х годов по ряду профилей, из которых не менее 8 пересекали КАЭ (рис. 8, а). Результаты описаны частями во многих статьях, в которых делается упор на тектонические выводы, а полученные данные МТЗ представлены фрагментарно. Авторы [Stanica et al., 1990] пишут, что использовали цифровую регистрацию и обработку с отбраковкой результатов по коэффициентам когерентности, однако фазовые данные не были увидены ни в одной статье. На рис. 8, б дана карта суммарной продольной проводимости осадочных образований по данным МТЗ, по которой виден масштаб работ и охваченная ими территория. На одном из детальных профилей пять пунктов МТЗ (номера 5—9 на врезке в правом верхнем углу рис. 8, б) авторы [Pinna et al., 1992] обозначили как лежащие над КАЭ. Эти кривые показаны на рис. 7, г. Все они, кроме кривых в пункте 9, имеют длинные нисходящие ветви, указывающие на существование корового проводника на глубине порядка 10 км с суммарной продольной проводимостью более 5000 См. Пункт 2 также следует считать лежащим над КАЭ. Отсутствие систематического расхождения поперечных и продольных кривых над осевой зоной интенсивной аномалии МВП представляется несколько странным.

Заключение. Приведенные данные МВП на Карпатской аномалии электропроводности еще раз показывают, что наиболее важную (для суждения о природе аномалии и определения перспектив ее практического использования) величину — глубину залегания верхней кромки аномального тела — МВП не определяет. Необходимо зондирование — МТЗ и желательно его комплексирование с активными методами, например с ЗСБЗ (зондирование становлением в ближней зоне) "петля в петле".

Список литературы

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир, 2009. 680 с.

Бондаренко А.П., Билинский А.И., Сегова Ф.И. Геомагнитные вариации в Советских Карпатах. Киев: Наук. думка, 1972. 114 с.

- Рокитянский И.И. Аномалия электропроводности в земной коре на Карпатах. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1972. № 10. С. 97—100.
- Рокитянский И.И. Заметки о геоэлектрике. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 235—244.
- Рокитянский И.И. Индукционное зондирование Земли. Киев: Наук. думка, 1981. 296 с.
- Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев; Наук. думка, 1975. 296 с.
- Рокитянский И.И. Фундаментальные модели аномалий электропроводности (1-D, 2-D). *Геофиз. журн.* 1988. Т. 10. № 3. С. 21—28.
- Рокитянский И.И., Ингеров А.И. Электромагнитные исследования Карпатской аномалии электропроводности. *Геофиз. журн.* 1999. Т. 21. № 4. С. 59—70.
- Харин Е.П. Изменчивость передаточных функций электромагнитного поля Земли во времени. *Геофиз. журн.* 1981. Т. 3. № 3. С. 16—23.
- Adam A., Wallner A., 1981. Information from electromagnetic induction data on Carpatho-Pannonian geodynamics. *Earth Evolution Sci.* (3-4), 280—284.
- Adam A., Vero J., Wallner A., 1972. Regional properties of geomagnetic induction arrows in Europe. *Acta Geod. Geophys. Mont. Hung.* 7 (3-4), 251—287.
- Calota F., Calton J., Jonescu A., Soare A., Stefla V., 1971. Inregistrari de variatii geomagnetice pe teritoriul Romaniei. P. I. *Stud. Cere. Geol. Geof. Geogr., Ser Geof.*, 9, 323—331.
- Ernst T., Brasse H., Cerv V., Hoffmann N., Jankowski J., Jozwiak W., Kreutzmann A., Neska A., Palshin N., Pedersen L.B., Smirnov M., Sokolova E., Varentsov I.M., 2008. Electromagnetic images of the deep structure of the Trans-European Suture Zone beneath Polish Pomerania. *Geophys. Res. Lett.* 35, L15307. doi:10.1029/2008GL034610.
- Jankowski J., 1965. Short-period variations of the Earth's magnetic field on the territory of Poland and their relations to deep substratum structure. *Acta Geophys. Polonica* 13, 85—105.
- Jankowski J., Tarlovski Z., Praus O., Pecova J., Petr V., 1985. The results of deep geomagnetic sounding in the West Carpathians. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 80, 561—574.
- Jozwiak W., 2012. Large-scale crustal conductivity pattern in Central Europe and its correlation to deep tectonic structures. *Pure Appl. Geophys.* 169, 1737—1747.
- Jozwiak W., 2013. Electromagnetic study of lithospheric structure in the marginal zone of East European Craton in NW Poland. *Acta Geophysica* 61 (5), 1101—1129.
- Kovacikova S., Cerv V., Ladavivskyy B.T., Logvinov I.M., Praus O., Tarasov V., 2005. Modeling of conductance within the West and Ukrainian Carpathians. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* C-95 (386), 29—37.
- Nowozynski K., 2012. Splines in the approximation of geomagnetic fields and their transforms at the Earth's surface. *Geophys. J. Int.* 189, 1369—1382.
- Pajunpaa K., Lahti I., Olafsdottir B., Korja T. and BEAR WG, 2002. Crustal conductivity anomalies in central Sweden and SW Finland. *Geophys. J. Int.* 150, 695—705.
- Pinna E., Soare A., Stanica D., Stanica M., 1992. Carpathian conductivity anomaly and its relation to deep structure of the substratum. *Acta Geod. Geophys. Mont. Hung.* 27 (1), 35—45.
- Praus O., 1971. Electric conductivity of the Earth in Czechoslovakia studied by magnetotelluric and geomagnetic methods. *Geophys. Final report XV Ass. IGGU.* Praha: Acad., P. 162—186.
- Rokityansky I.I., 1982. Geoelectromagnetic investigation of the Earth's crust and upper mantle. Berlin — Heidelberg — New York: Springer Verlag, 381 p.
- Rokityansky I.I., Kulik S.N., Logvinov I.M., Shuman V.N., 1975. The electric conductivity anomaly in the Carpathians. *Acta Geod. Geophys. Mont. Hung.* 10 (3), 277—286.
- Stanica D., Stanica M., Pinna M., 1990. Magnetotelluric soundings in the Eastern Carpathians — Hurghita area. *Rev. Roum. Geophys.* 34, 89—95.
- Stanica M., Stanica D., Marin-Furnica C., 1999. The placement of the Trans-European Suture Zone on the Romanian territory by electromagentic arguments. *Earth Planets Space* 51, 1073—1078.
- Stefaniuk M., Ostrowski G., Targosz P., Wojdyla M., 2009. Some problems of magnetotelluric and gravity structural investigations in the Polish Eastern Carpathians. *Geologia* 35 (4/1), 7—46.
- Varentsov I.V., Sokolova E.Yu., Martanus E.R., 2005. Array view on electromagnetic transfer functions in the EMTESZ-Pomerania Project. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* 386 (C-95), 107—121.

- Weaver J. T., 1964. On the separation of local geomagnetic fields into external and internal parts. *Zeitschrift für Geophysik* 30, 29—36.
- Wiese H., 1965. *Geomagnetische Tiefentellurik*. Berlin: Akademie Verlag, 146 p.
- Wybraniec S., Jankowski J., Ernst T., Pecova J., Praus O., 1999. A new method for presentation of induction vector distribution in Europe. *Acta Geophys. Pol.* 47 (3), 323—334.
- Zytko K., 1997. Electrical conductivity anomaly of the Northern Carpathians and the deep structure of the orogen. *Ann. Soc. Geol. Pol.* 67, 25—43.

On the Carpathian electrical conductivity anomaly depth study

© I. I. Rokityansky, V. I. Babak, A. V. Tereshyn, 2014

Carpathian electrical conductivity anomaly (CECA) was discovered in the 1960ies and intensively studied by both individual institutions and within the framework of international projects in many countries, but without any strategic plan, which should be based on the definition of research objective, abilities of used methods (MVP and MTS) and rules of their interaction. The paper presents the main results of CECA research: construction of induction vectors in more than 1000 points, putting the anomaly on map, estimation by MVP methods of maximum possible depth of anomalous currents center and total longitudinal conductance of anomalous body. True depth of anomaly upper edge was defined by MTS method only in three localities and the works were performed 25—40 years ago. Goal of future CECA researches should be study of its nature (fluids or electronically conducting minerals) and prospects of practical use (minerals, geothermal energy ...). The first step in this direction should be MTS fulfillment (and/or other soundings) over the axis of the CECA to select locations for drilling.

Key words: Carpathian electrical conductivity anomaly, magnetotelluric sounding, magnetovariational profiling, Wiese induction vector, horizontal magnetic tensor.

References

- Berdichevskiy M. N., Dmitriev V. I., 2009. Models and methods of magnetotellurics. Moscow: Nauchny mir, 680 p. (in Russian).
- Bondarenko A. P., Bilinskiy A. I., Sedova F. I., 1972. Geomagnetic variations in the Soviet Carpathians. Kiev: Naukova Dumka, 114 p. (in Russian).
- Rokityansky I. I., 1972. Conductivity anomaly in the crust of the Carpathians. *Izvestija AN SSSR. Fizika Zemli* (10), 97—100 (in Russian).
- Rokityansky I. I., 2012. Fundamental models of conductivity anomalies. *Geofizicheskij zhurnal* 34 (4), 235—244 (in Russian).
- Rokityansky I. I., 1981. Induction sounding of the Earth. Kiev: Naukova Dumka, 296 p. (in Russian).
- Rokityansky I. I., 1975. Investigation of the electrical conductivity anomalies by magnetovariational profiling method. Kiev: Naukova Dumka, 296 p. (in Russian).
- Rokityansky I. I., 1988. Fundamental models of conductivity anomalies. *Geofizicheskij zhurnal* 10 (3), 21—28 (in Russian).
- Rokityansky I. I., Ingerov A. I., 1999. Electromagnetic investigations of Carpathian electrical conductivity anomaly. *Geofizicheskij zhurnal* 21 (4), 59—70 (in Russian).
- Kharin E. P., 1981. The variability of transfer functions of the electromagnetic field of the Earth in time. *Geofizicheskij zhurnal* 3(3), 16—23 (in Russian)].
- Adam A., Wallner A., 1981. Information from electromagnetic induction data on Carpatho-Pannonian geodynamics. *Earth Evolution Sci.* (3-4), 280—284.
- Adam A., Vero J., Wallner A., 1972. Regional properties of geomagnetic induction arrows in Europe. *Acta Geod. Geophys. Mont. Hung.* 7 (3-4), 251—287.

- Calota F., Calton J., Jonescu A., Soare A., Stefla V., 1971. Inregistrari de variatii geomagnetice pe teritoriul Pomaniei. P. I. *Stud. Cere. Geol. Geof. Geogr., Ser. Geof.*, 9, 323—331.
- Ernst T., Brasse H., Cerv V., Hoffmann N., Jankowski J., Jozwiak W., Kreutzmann A., Neska A., Palshin N., Pedersen L.B., Smirnov M., Sokolova E., Varentsov I.M., 2008. Electromagnetic images of the deep structure of the Trans-European Suture Zone beneath Polish Pomerania. *Geophys. Res. Lett.* 35, L15307. doi:10.1029/2008GL034610.
- Jankowski J., 1965. Short-period variations of the Earth's magnetic field on the territory of Poland and their relations to deep substratum structure. *Acta Geophys. Polonica* 13, 85—105.
- Jankowski J., Tarlovski Z., Praus O., Pecova J., Petr V., 1985. The results of deep geomagnetic sounding in the West Carpathians. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 80, 561—574.
- Jozwiak W., 2012. Large-scale crustal conductivity pattern in Central Europe and its correlation to deep tectonic structures. *Pure Appl. Geophys.* 169, 1737—1747.
- Jozwiak W., 2013. Electromagnetic study of lithospheric structure in the marginal zone of East European Craton in NW Poland. *Acta Geophysica* 61 (5), 1101—1129.
- Kovacikova S., Cerv V., Ladanivskyy B.T., Logvinov I.M., Praus O., Tarasov V., 2005. Modeling of conductance within the West and Ukrainian Carpathians. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* C-95 (386), 29—37.
- Nowozynski K., 2012. Splines in the approximation of geomagnetic fields and their transforms at the Earth's surface. *Geophys. J. Int.* 189, 1369—1382.
- Pajunpaa K., Lahti I., Olafsdottir B., Korja T. and BEAR WG, 2002. Crustal conductivity anomalies in central Sweden and SW Finland. *Geophys. J. Int.* 150, 695—705.
- Pinna E., Soare A., Stanica D., Stanica M., 1992. Carpathian conductivity anomaly and its relation to deep structure of the substratum. *Acta Geod. Geophys. Mont. Hung.* 27 (1), 35—45.
- Praus O., 1971. Electric conductivity of the Earth in Czechoslovakia studied by magnetotelluric and geomagnetic methods. Geophys. Final report XV Ass. IGGU. Praha: Acad., P. 162—186.
- Rokityansky I.I., 1982. Geoelectromagnetic investigation of the Earth's crust and upper mantle. Berlin — Heidelberg — New York: Springer Verlag, 381 p.
- Rokityansky I.I., Kulik S.N., Logvinov I.M., Shuman V.N., 1975. The electric conductivity anomaly in the Carpathians. *Acta Geod. Geophys. Mont. Hung.* 10 (3), 277—286.
- Stanica D., Stanica M., Pinna M., 1990. Magnetotelluric soundings in the Eastern Carpathians — Hurghita area. *Rev. Roum. Geophys.* 34, 89—95.
- Stanica M., Stanica D., Marin-Furnica C., 1999. The placement of the Trans-European Suture Zone on the Romanian territory by electromagnetic arguments. *Earth Planets Space* 51, 1073—1078.
- Stefaniuk M., Ostrowski G., Targosz P., Wojdyla M., 2009. Some problems of magnetotelluric and gravity structural investigations in the Polish Eastern Carpathians. *Geologia* 35 (4/1), 7—46.
- Varentsov I.V., Sokolova E.Yu., Martanus E.R., 2005. Array view on electromagnetic transfer functions in the EMTESZ-Pomerania Project. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* 386 (C-95), 107—121.
- Weaver J.T., 1964. On the separation of local geomagnetic fields into external and internal parts. *Zeitschrift für Geophysik* 30, 29—36.
- Wiese H., 1965. Geomagnetische Tiefentellurik. Berlin: Akademie Verlag, 146 p.
- Wybraniec S., Jankowski J., Ernst T., Pecova J., Praus O., 1999. A new method for presentation of induction vector distribution in Europe. *Acta Geophys. Pol.* 47 (3), 323—334.
- Zytka K., 1997. Electrical conductivity anomaly of the Northern Carpathians and the deep structure of the orogen. *Ann. Soc. Geol. Pol.* 67, 25—43.