

Аномалии электропроводности в зонах сочленения архейских и протерозойских геоблоков Украинского и Балтийского щитов

**И.И. Рокитянский¹, Е.Ю. Соколова^{2,3}, А.В. Терешин¹, А.Г. Яковлев^{4,5}
и Рабочая группа LADOGA*, 2018**

¹Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ООО "Северо-Запад", Москва, Россия

Поступила 21 июня 2018 г.

Наведено результати вивчення Кіровоградської (КАЕ) та Ладозької (ЛАЕ) аномалій корової електропровідності, розташованих у межах Сарматського і Фенноскандинавського доменів композитного Східноєвропейського кратону. Основна увага приділяється ділянкам аномалій, що маркують регіональні лінійні зони зчленування архейських (AR) і протерозойських (PR) геоблоків. Для Фенноскандії аналіз спирається на дані найновіших детальних магнітотелуричних (МТЗ) і магнітоваріаційних (МВП) зондувань з пріоритетним використанням аномальних полів горизонтальних компонент геомагнітних варіацій (тензора М). Зіставлення геоелектричних параметрів КАЕ і ЛАЕ розкриває основні риси їх схожості та відмінності. Обидві аномалії складаються з двох квазіпаралельних провідників "А" і "Б", віддалених один від одного на відстань 50—100 км. Основні провідники "А" розташовані в мегаблоках PR віку. Вони були виявлені за аномальною поведінкою геомагнітних варіацій (метод МВП) і мають максимум частотної характеристики параметрів МВП (вектори індукції і тензор М) на періодах $T_0 \approx 1 + 2$ тис. с, що дає близькі оцінки сумарної поздовжньої провідності $G \approx (1-3) \cdot 10^8$ См · м для обох аномалій КАЕ і ЛАЕ. Субпаралельні провідники "Б" більш "високочастотні" ($T_0 \approx 100 + 300$ с) і менш провідні ($G \approx (0,4-2) \cdot 10^7$ См · м). Провідник "Б" приурочений безпосередньо до межі AR-PR, яка маркується регіональними розломами: Яніс'ярвнським на Балтійському щиті і Криворізько-Кременчуцьким на Українському щиті. Недавні дослідження за проектом KIROVOGRAD виявили Бярятинську аномалію електропровідності на східному схилі Воронежського масиву, яку можна розглядати як північне продовження КАЕ до $54,5^\circ$ півн. ш. Південним продовженням ЛАЕ є Ільменська аномалія на 58° півн. ш., що тягнеться до 56° і, ймовірно, має гілку, яка з'єднує її з Бярятинською аномалією. Ці дані свідчать про існування Транс'європейського субмеридіонального ланцюга аномалій електропровідності (ТЕЛАЕ) — від північного кінця Ботнічної затоки до Чорного моря. Наведено геофізичні матеріали, які узгоджуються з цим припущенням. Найбільший інтерес становить просторовий збіг деяких ділянок ТЕЛАЕ із зонами градієнта трансрегіональної аномалії постійного магнітного поля (АПМП), причому позитивні АПМП розташовані на схід від аномалій електропровідності, а негативні — на захід від них.

Ключові слова: магнітоваріаційне профілювання, горизонтальний магнітний тензор, індукційні вектори, аномалія електропровідності, докембрійські щити, архейські і протерозойські геоблоки, трансрегіональні лінеаменти і геофізичні аномалії.

* Варданыц Белла Леоновна, Голубцова Ніна Сергеевна, Золотая Людмила Алексеевна, Коснырева Марія Владимировна, Куликов Віктор Александрович, Минц Михайл Вениаминович, Нилов Михайл Юрьевич, Пушкарев Павел Юрьевич, Рокитянский Игорь Іванович, Рязанцев Павел Александрович, Смирнов Максим Юрьевич, Соколова Елена Юрьевна, Таран Яна Валентиновна, Терешин Артем Валерієвич, Успенский Николай Іванович, Яковлев Андрей Георгиевич.

Введение. 50 лет назад на Украинском щите была обнаружена Кировоградская аномалия электропроводности [Рокитянский и др., 1969]. Это существенно меняло общепринятые представления о доминанте плохо проводящих кристаллических пород в докембрийских провинциях. Вторым ярким подтверждением существования больших контрастов электропроводности в фундаменте Восточно-Европейского кратона (ВЕК) стала открытая спустя 10 лет после Кировоградской аномалии электропроводности (КАЭ) и подобная ей по величине Ладожская аномалия электропроводности (ЛАЭ) [Рокитянский и др., 1981], расположенная на северном и южном берегах Ладожского озера, на границе Карельского и Свекофеннского геоблоков Балтийского (Фенноскандинавского) щита.

Дальнейшее распространение геоэлектромагнитных исследований показало, что подобные аномалии встречаются и на других щитах (см. обзор [Жамалетдинов, Кулик, 2012]), имея тенденцию располагаться в пределах протерозойских областей (PR) вблизи границ с областями, сложенными преимущественно архейскими породными комплексами (AR). Сочленение происходит вдоль крупных шовных зон, отличающихся большими запасами минеральных ресурсов и уникальной сохранностью структур докембрийской тектоники. В связи с этим всестороннее изучение этих зон, включая и маркирующие их аномалии коровой электропроводности, имеет большой теоретический и практический интерес.

Принято полагать, что ВЕК состоит из трех литосферных сегментов — Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии (рис. 1). Вопросы тектоники, истории формирования, структурных и других особенностей этих образований освящены в обширной литературе (например [Bogdanova et al., 1996; Mints et al., 2015; Artemieva, Shulgin, 2015 и др.]).

На Украинском щите выделяют пять мегаблоков, три из которых (Белоцерковско-Среднебугский, Среднеприднепровский и Приазовский) сложены, главным

образом, архейскими породами, а Ингульский и Волыно-Подольский — протерозойскими [Очерки ..., 2018 и др.]. На Балтийском щите в направлении с северо-востока на юго-запад сменяются следующие геоструктурные домены: преимущественно архейское, стабильное ядро щита — Кола-Карельский мегаблок, Свекофеннский палеопротерозойский коллизионный ороген и расположенный на самых западных рубежах Фенноскандии — Свеконорвежский каледонский ороген [Хаин, 2001]. Более древняя северо-восточная часть щита отделена от области Свекофеннского орогена Ладого-Ботнической подвижной зоной (в иной терминологии — Раахе-Ладожской сутурой) [Kõrja et al., 2002; Mints et al., 2015].

Протерозойские мегаблоки и приграничные шовные зоны докембрийских кратонов были порождены взаимодействием древних, стабилизировавшихся в основном в раннем — среднем архее, микроконтинентов с окружавшими их на рубеже раннего протерозоя океаническими структурами. Формации шовных зон накапливались в межконтинентальных бассейнах с корой океанического типа, континентальных склонах и шельфах, в прилегающих к ним эпиконтинентальных бассейнах. В итоге при участии активного флюидо- и массопереноса были сформированы эти сложнопостроенные, уходящие на большие глубины геологические образования. В результате кристаллизации из растворов, циркулирующих в разломных зонах, а также последовавших метаморфических преобразований вулканогенно-осадочных толщ к концу этого периода были сформированы супра- и инфракрустальные породные комплексы, обогащенные графитом, сульфидами и другими рудными полезными ископаемыми. Многие из них проявляются как разномасштабные проводящие зоны в земной коре. Они наблюдаются на значительной площади Ингульского и Свекофеннского мегаблоков протерозойского возраста на Украинском и Балтийском щитах, соответственно.



Рис. 1. Трансъевропейская цепь региональных аномалий электропроводности (ТЕЦАЭ) (даны белым цветом): Кировоградская (КАЭ, проводники А и Б), Барятинская (БАР с ответвлением К — Курская аномалия), Ладожско-Ильменская (ЛАЭ + И), Московско-Тамбовская (МТ) и Южно-Финляндская (ЮФ) представлена на фоне трехсегментной карты Восточно-Европейского кратона (ВЕК), предложенной С.В. Богдановой (адаптирована из работы [Vaittinen et al., 2012]). Двумя трапециями оконтурены территории, представленные на рис. 6 и 10.

Целью настоящего исследования является анализ геоэлектрического строения зон сочленения архейских и протерозойских областей на двух докембрийских щитах ВЕК для выявления черт их общности и различия и обсуждения природы аномальной электропроводности. Материал для анализа почерпнут из литературных данных, описывающих итоги предшествующих исследований, а также из результатов специального изучения пространственно-частотных распределений магнитовариационных (МВ) и магнитотеллурических (МТ) откликов электро-

проводящих структур в контактных зонах архейских и протерозойских областей обоих щитов. По Балтийскому щиту рассматриваются как старые данные, так и недавние синхронные ЭМ зондирования. Детально анализируется пространственно-частотное поведение горизонтального магнитного тензора, а также векторов индукции с целью определения простирания хорошо проводящих структур и их других параметров. Высокое качество использованных наблюдений и их обработки позволяет использовать современные схемы инвариантного анализа синхронных данных.

На Украинском щите в нашем распоряжении имелись векторы индукции и кривые МТЗ, полученные в 1970—1990 годы, которые содержат достоверную информацию об особенностях геоэлектрической структуры земной коры в зоне архейско-протерозойского контакта, полезную для данной работы. Горизонтальный тензор, к сожалению, не определялся и не использовался.

Методика работ. Методы магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и магнитовариационного профилирования (МВП) для исследования электропроводности земной коры и верхней мантии используют естественные электромагнитные поля токов в ионосфере и магнитосфере Земли. Теория методов развита для упрощенных моделей источника поля и структуры Земли. Количество наблюдений и их точность всегда недостаточны, поэтому результаты интерпретации, т. е. построения геоэлектрических моделей, всегда неоднозначны. Для выбора наиболее устойчивых электромагнитных (ЭМ) параметров для интерпретации и оптимизации ее результатов разрабатывается множество методических подходов, описанных в обширной литературе и обобщенных в ряде монографий (например, [Бердичевский и Дмитриев, 2009] — наиболее полной и современной). Здесь мы ограничимся кратким описанием функций отклика МВП — тензора M и вектора индукции C .

Определение аномального магнитного тензора M предполагает, что на площади проведения работ поле магнитосферно-ионосферного источника можно аппроксимировать однородной плоской волной, а также, что на горизонтально-слоистом (без латеральных неоднородностей электропроводности) участке имеется базисная обсерватория, в которой ведутся наблюдения синхронно с полевыми пунктами. Тогда, если горизонтальное поле (B_x, B_y) в полевой точке отличается от поля (B_{x0}, B_{y0}) в базисной точке, то это означает, что под полевой точкой существует избыточный ток, концентрирующийся в некоторой аномалии электропроводности в зем-

ной коре. Горизонтальный магнитный тензор M , характеризующий эту аномалию, определяется из системы двух комплекснозначных уравнений [Schmucker, 1970]:

$$B_x = M_{xx} B_{x0} + M_{xy} B_{y0},$$

$$B_y = M_{yx} B_{x0} + M_{yy} B_{y0}.$$

Компоненты тензора M зависят от выбора осей, определитель (детерминант) матрицы M является инвариантом. Полезным инвариантом является эллипс магнитного возмущения, большая полуось которого указывает направление максимально аномального горизонтального геомагнитного поля в пункте наблюдения, а при повороте эллипса на 90° указывает направление аномальных токов в Земле. В настоящей статье используем только повернутые эллипсы и будем их называть аномальные токовые эллипсы (АТЭ).

Методика интерпретации тензора горизонтального аномального магнитного поля $[M]$ разработана в пионерских работах [Schmucker 1970; Fujiwara, Toh, 1996] и обстоятельно изложена в монографиях [Рокитянский, 1975; Varentsov, 2007; Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Там же рассмотрено и использование вектора индукции

$$C = A e_x + B e_y,$$

где e_x и e_y — единичные векторы вдоль осей x и y . A и B составляют матрицу 1×2 , преобразующую горизонтальные магнитные компоненты B_x, B_y в вертикальную B_z :

$$B_z = A B_x + B B_y.$$

Из последнего уравнения определяются A и B . При учете фаз это — комплексные компоненты вектора индукции. Действительный вектор

$$C_u = A_u e_x + B_u e_y$$

в конвенции Визе направлен от хорошо проводящей аномалии (в конвенции Паркинсона, наоборот, — к ней) и мнимый:

$$C_v = A_v e_x + B_v e_y$$

на 2D структуре параллелен действитель-

ному на коротких периодах и антипараллелен ему на длинных. Сами векторы Визе и Паркинсона строятся без учета фаз. В окрестностях максимума частотной характеристики аномального поля они приближенно равны действительным векторам соответствующей конвенции. Компоненты тензора M , включая эллипсы, также содержат действительные и мнимые части, однако в большинстве работ ограничиваются рассмотрением действительных частей. Вообще тензор M используется весьма редко, а между тем он несет наиболее достоверную информацию об аномальных токах и, следовательно, об аномальном проводнике. Эта информация локальная, т. е. непосредственно о проводнике под пунктом наблюдения. Этим она отличается от вектора индукции, который несет информацию о проводниках в стороне от пункта наблюдения и может "собирать" информацию от нескольких разнонаправленных проводников, что осложняет интерпретацию. Главное в проблеме вычисления и использования горизонтального тензора — это наличие доступного, хорошо апробированного долговременного базисного пункта на горизонтально-слоистой структуре. Идеально горизонтально-слоистых структур на Земле нет. Однако, если компоненты горизонтального геомагнитного поля в требуемом диапазоне периодов не содержат (с допустимой неопределенностью) во вторичной (внутренней) части поля пространственных гармоник, отсутствующих в первичной (внешней) части поля, то такая обсерватория может выполнять функции базисного пункта при вычислении тензора M . Более простой, но более грубый способ был использован при раннем исследовании Кировоградской аномалии, горизонтальные компоненты нормировались к синхронным компонентам обсерватории Дымер и на трех профилях аномальное поле в D -компоненте достигало 80 % над осью аномалии, а при удалении от оси на 100 км оно в пределах 10 % уменьшалось до нуля, т. е. наблюдаемое поле в D -компоненте в двух северных, централь-

ном и южном безаномальных участках УЩ одинаково с полем в Дымере для исследованного интервала периодов 300—3000 с [Рокитянский, 1975, рис. 56]. Таким образом, поле в Дымере можно с определенным приближением считать удовлетворительной базой для вычисления тензора M . Однако степень приближения необходимо исследовать более тщательно на основе современной синхронизации GPS в широком диапазоне периодов.

При проведении синхронных зондирований в 2013—2018 гг. на юго-востоке Балтийского щита группой LADOGA в качестве единой базы для нормировки горизонтальных магнитных полей использовался пункт L04 (рис. 2, а), расположенный в пределах достаточно однородного в геоэлектрическом смысле блока южной части Карельского массива и характеризующийся низким уровнем ЭМ помех.

Балтийский щит. Ладожско-Ботническая подвижная зона (ЛБЗ) расположена в пределах области Свекофеннской (палеопротерозойской) орогении и протягивается более чем на 700 км вдоль границы с архейским Карельским кратоном, простирающейся в северо-западном—юго-восточном направлении, как и многочисленные долгоживущие разломы в пределах ЛБЗ. Древние разломные зоны часто оказываются "залеченными" различной минерализацией пород, в том числе графитизацией и сульфидизацией, а неотектонические, активные (в том числе омоложенные древние) в своих верхних, относительно более проницаемых, частях коры насыщены флюидами, минерализация которых увеличивается с глубиной.

Супракристалльные и инфракристалльные углеродсодержащие комплексы располагаются на различных глубинных этапах. В близповерхностных горизонтах они вскрыты скважинами. Например, первый километр, пройденный к 1984 г. в скв. Оутокумпу (знаменитого рудного района Финляндии, расположенного в пределах ЛБЗ), насчитал интегральную электропроводность в 3400 См в четырех толщах графитовых сланцев общей мощно-

стью 136 м [Korja, 2002], а пройденные к 2010 г. остальные 1500 м также неоднократно пересекали графитоносные супра-крупные слои [Kukkonen, 2011]. Итак, следует полагать, что оба типа электропроводности (как электронная, так и ионная) могут вносить вклад в наблюдаемые вдоль ЛБЗ цепочки аномалий повышенной проводимости [Korja et al., 2002; Vaittinen et al., 2012; Минц, Соколова, 2018 и др.].

Благодаря своей геотектонической позиции ЛБЗ стала одним из важнейших опорных геолого-геофизических полигонов для реконструкции докембрийской истории Балтийского щита. Ее западный сегмент изучался в ходе ряда крупных современных геофизических экспериментов: BEAR, SVECALAPKO, FIRE, MT-FIRE [Korja et al., 2002; Hielt et al., 2006; Vaittinen et al., 2012]. В пределах юга Карелии этой зоне соответствует область Приладожья, также привлекавшая внимание исследователей [Глубинное ..., 2004; Шаров, 2017; Ковтун и др., 2004]. Наибольшее количество работ посвящено Северному Приладожью, которое является богатой минерагенической провинцией. Здесь проводились сейсмические (ГСЗ и МОВЗ) и электромагнитные исследования [Глубинное ..., 2004]. Однако в отличие от центральной части Свеккофеннского орогена современные методы МОГТ, способные обеспечить высокое разрешение коровых структур, здесь не применялись.

Электромагнитные наблюдения в Северном Приладожье были начаты в конце 1960 годов Институтом геологии КФ АН СССР, Ленинградским Университетом и Горным институтом преимущественно с использованием метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Однако метод МТЗ в его первоначальной постановке сталкивался с рядом трудностей при изучении этого сложнопостроенного региона. В то же время применение метода магнитовариационного профилирования (МВП) сотрудниками Института геофизики АН УССР, в котором были развиты новая теория и методика МВП, позво-

лило сделать достоверное заключение о наличии региональной аномалии электропроводности под Ладожским озером и определить ее основные интегральные параметры [Рокитянский и др., 1981]. Это открытие было сделано по наблюдениям без высокоточной синхронизации, с помощью ручной обработки, в основном с опорой только на амплитудные данные. На следующем этапе развития магнитотеллурического метода, в 90 годах прошлого века Ленинградским университетом был выполнен профиль МТЗ Выборг—Суоярви, позволивший построить первую модель сечения Ладожской аномалии электропроводности [Ковтун и др., 1998, 2011].

В 2013—2015 годах геоэлектрики из ИФЗ РАН, МГУ, СПбГУ и ООО "Северо-Запад", объединившиеся в Рабочую группу LADOGA, с целью повысить разрешение коровых геоэлектрических структур выполнили на современном техническом и методическом уровне синхронные пятикомпонентные наблюдения вдоль профиля Выборг—Суоярви-2 (ВС-2): 43 зондирования станциями Phoenix MTU-5 (Канада) и 9 пунктов с LEMI-417 (Львов, Украина) с одновременными измерениями в стационарных базовых пунктах. Рис. 2, а показывает положение профиля ВС-2 и инвариантные параметры передаточных функций МВП для периода 1024 с, характеризующие геомагнитный отклик глубинных зон максимальной концентрации токов в земной коре (осевые зоны проводников ЛАЭ, заключенные в пунктирных линиях и помеченные буквами "А" и "Б"). Подробное описание результатов наблюдения и обработки полученных данных, а также первый опыт интерпретации в региональном плане представлены в работах [Соколова и др., 2016; Минц, Соколова, 2018]. В стадии подготовки находятся работы по интерпретации с применением квазитрехмерных пленочных и объемных трехмерных моделей, а также по физико-геологическому истолкованию геоэлектрических результатов в комплексе с региональными потенциальными полями. Настоящая работа сфокусирована на детальном ана-

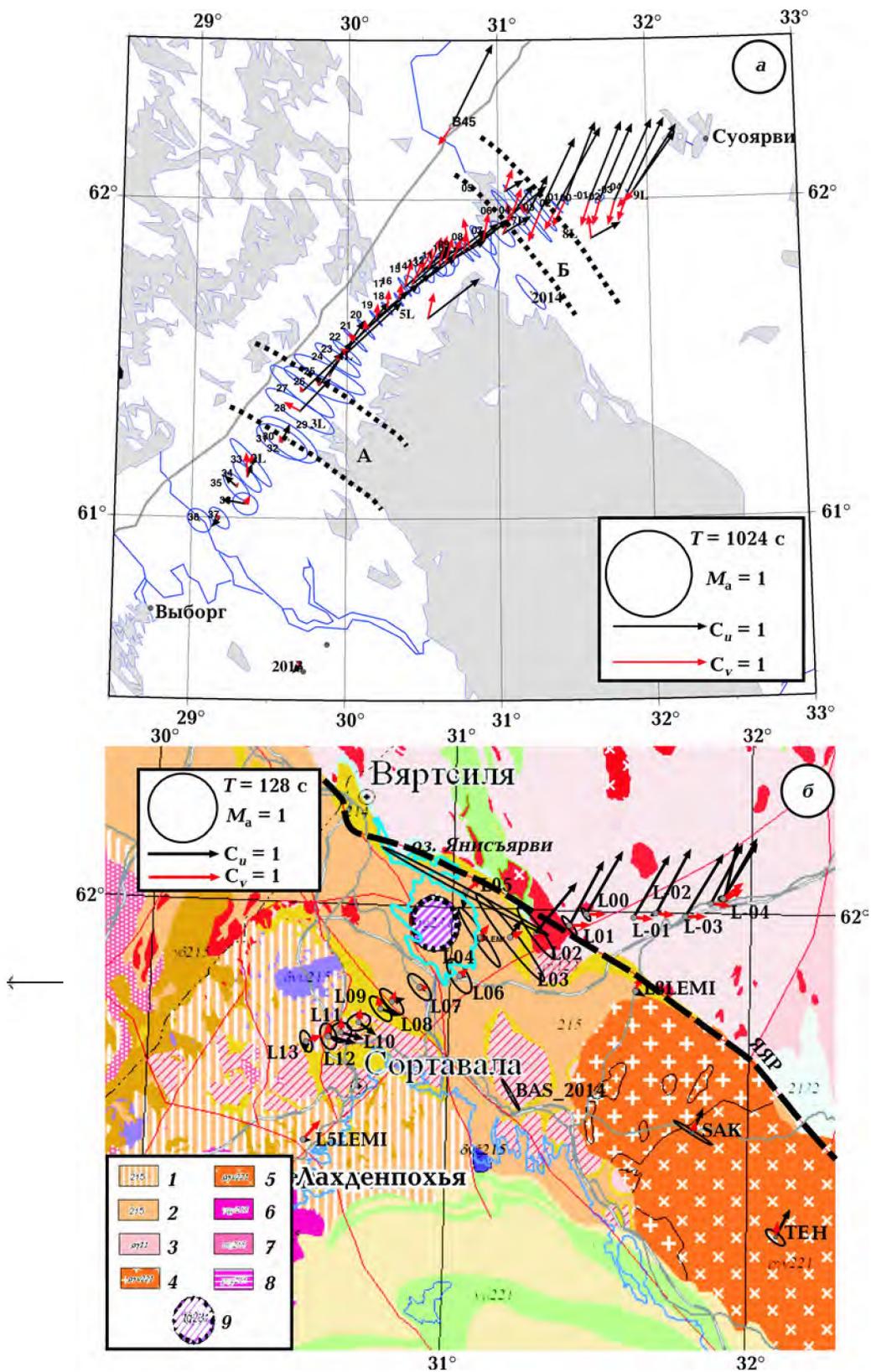
лизе магнитовариационных функций отклика (МВП) на примере материалов одного из ключевых участков профиля ВС-2 — его северо-восточного окончания, зоны непосредственного сочленения архейского и протерозойского геоблоков (рис. 2, б).

В пределах Карельского мегаблока удельное сопротивление земной коры превышает 10^4 Ом·м [Ковтун и др., 1998; Соколова и др., 2016] и, как показывает рис. 2, б, горизонтальное геомагнитное поле в длиннопериодном диапазоне периодов во всех точках этого отрезка профиля практически одинаково с полем в базовом пункте (L-04). При пересечении Янисъярвинского разлома (ЯЯР) аномалии горизонтальных компонент резко возрастают вплоть до утроения поля в пункте L05 (см. рис. 2—4). Повернутые на 90° эллипсы горизонтального аномального поля показывают направление протекающего аномального тока и, следовательно, простирание зоны аномальной проводимости. В пунктах L02—L06 горизонтальное поле увеличено в два и более раз, а вызвавший это увеличение теллурический ток имеет азимут $140\text{—}145^\circ$. Аномальный проводник "Б" на рис. 2, а, соответствующий этим наблюдаемым данным, будем рассматривать как элемент Ладожской аномалии, приуроченный непосредственно к AR-PR кон-

такту. Наиболее проводящий и глубокий объект ЛАЭ выражен в аномалии "А" на рис. 2, а длиннопериодных оценок эллипсов M_a (для аномального горизонтального магнитного поля), отмечаемой в 80 км юго-западнее под пунктами 24—30. Простирание этого проводника $130\text{—}135^\circ$. В промежуточной между "А" и "Б" полосе амплитуда эллипсов значительно меньше, а простирание токов примерно такое же, как в основных проводниках, что дает основание предполагать "региональную двумерность" глубокой части ЛАЭ и даже при наличии локальных трехмерных эффектов применять для ее изучения 2D интерпретационные подходы.

В пункте L05 ориентация эллипсов отклоняется от региональной на $15\text{—}20^\circ$ и точно соответствует простиранию ЯЯР, в зоне которого и расположен данный пункт наблюдения. По-видимому, локальный проводящий объект — проработанная графитизацией или сульфидизацией разломная зона, выходящая близко к поверхности в окрестностях озера Янисъярви и субпараллельная главному Янисъярвинскому разлому, которая вносит локальные искажения в магнитные измерения в пункте L05, линейно поляризуя поле вдоль своего простирания. Рядом с L05, в котловине озера Янисъярви, находится одноименная верхнерифейская астроблема в виде

Рис. 2. Расположение пунктов синхронных широкополосных наблюдений 2013—2015 гг. группы LADOGA [Соколова и др., 2016] на профиле Выборг—Суоярви (ВС-2) (а) и инвариантные МВ параметры для периодов 1024 и 128 с (б): реальные векторы индукции C_u (здесь и далее в конвенции Визе) — черные стрелки, мнимые векторы индукции C_v — красные стрелки; оценки магнитного тензора M_a аномального горизонтального поля, здесь и далее полученные относительно самой крайней северо-восточной точки профиля — L-04, представленные экстремальными эллипсами, повернутыми на 90° (большая ось дает направление аномального тока). Масштаб векторов задан длиной единичных стрелок, масштаб эллипсов — окружностью единичного радиуса. На рис. 2, а буквами "А" и "Б" обозначены полосы максимальной концентрации токов в земной коре (осевые зоны проводников, составляющих ЛАЭ). На рис. 2, б представлены МВ параметры для $T = 128$ с в пунктах зондирования на участке профиля ВС-2 в окрестности проводника "Б" и в двух пунктах полевой компании 2016 г. (SAK и ТЕН). Они показаны на фоне фрагмента геологической карты из работы [Куликов и др., 2016]; ЯЯР — Янисъярвинский разлом, разделяющий архейский и протерозойский геоблоки Балтийского щита: 1 — биотитовые гнейсы, кристаллосланцы высокой степени метаморфизма; 2 — кварциты, песчаники, аргиллиты, алевролиты, углеродистые сланцы и их метаморфизованные аналоги; 3 — тоналиты, гранодиориты; 4, 5 — посторогенные анортозит-рапакиви, гнейсовые комплексы; 6 — монцодиориты гранодиориты; 7 — гранулиты; гнейсограниты; 8 — эндербиты, чарнокиты (1, 2 — свекофенниты палеопротерозоя, калевий; 3 — палеоархейские карелиды, частично омоложенные; 4, 5 — мезопротерозой; 6—8 — калевий); 9 — Янисъярвинская астроблема.



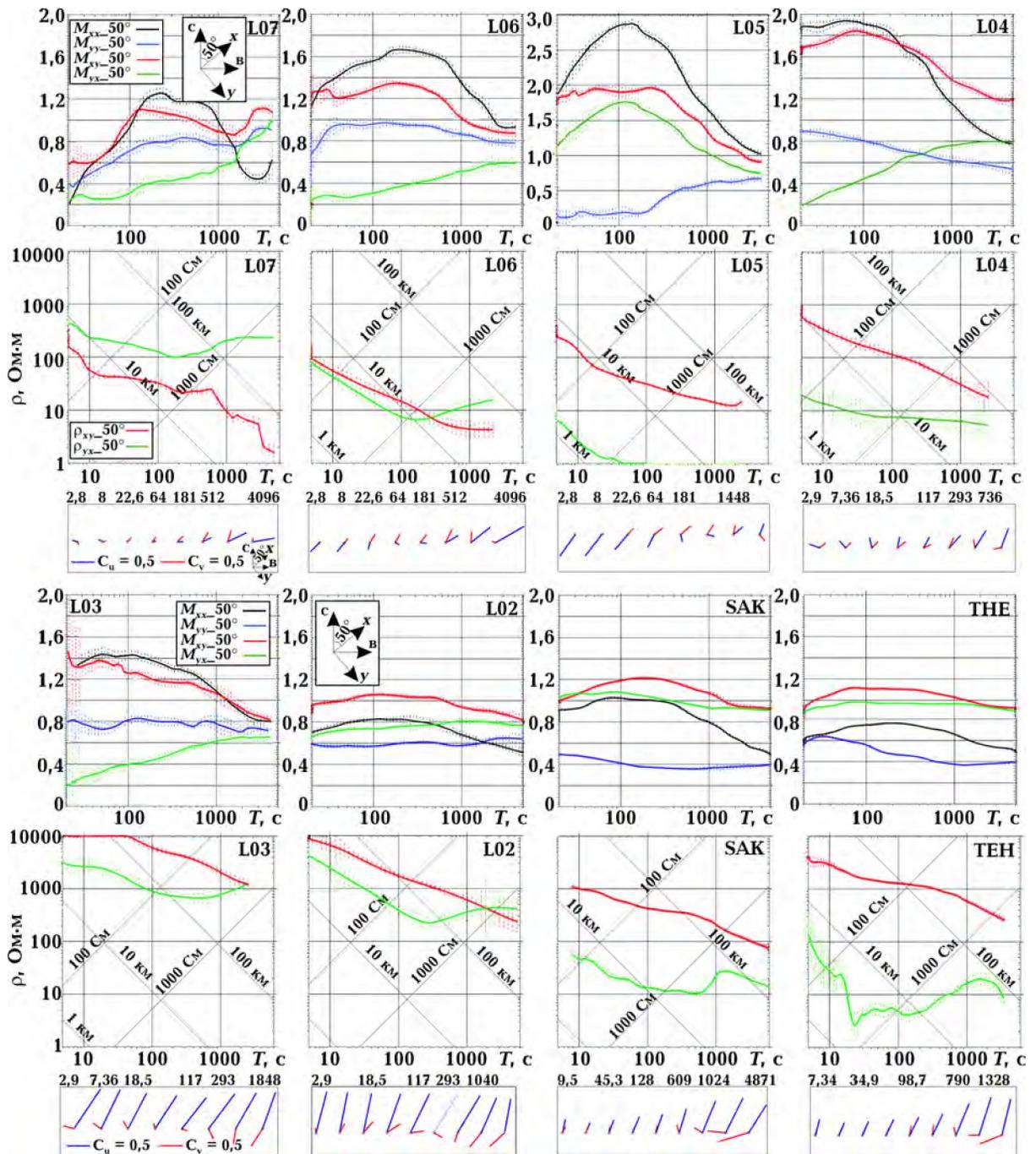


Рис. 3. Частотные характеристики модулей компонент магнитного тензора M_a , рассчитанного относительно базы, выбранной в самой крайней северо-восточной точке профиля — L-04, кажущееся сопротивление ρ_k с доверительными интервалами и векторы индукции для набора периодов в восьми пунктах зондирования 2014—2016 гг. Компоненты “x” и “y” для M и ρ_k получены путем вращения наблюдаемых вдоль северо-южного и восточно-западного направлений кривых на 50° к востоку, т.е. вкrest простираения оси однородности квазидвумерной структуры ЛАЭ.

древнего (725 ± 5 млн лет) глубоко эродированного импактного кратера с начальным диаметром ~ 14 км (отмечена круж-

ком на карте рис. 2, б [Куликов и др., 2016]). В ее импактиках установлены коэзит, стишовит, самородное железо, вюстит и кри-

сталлиты алмаза. Обтекание этого, в целом, плохо проводящего объекта, может также отклонять токи от регионального направления и концентрировать их под пунктом L05.

На рис. 3 представлены компоненты магнитного тензора и кажущиеся сопротивления в осях (x, y) , повернутых на 50° по часовой стрелке. Осью однородности, определенной по горизонтальному тензору, является ось y с азимутом 140° . Таким образом $\rho_{кху}$, показанная зеленым цветом, является продольной кривой. Все кривые характеризуются нисходящей ветвью, отбивающей при формальной асимптотической интерпретации глубины от 1 до 10 км и более. Поведение компонент тензора M на аномальных пунктах находит свое объяснение: максимальной компонентой является M_{xx} , положение ее максимума определяет T_0 аномального проводника. Интересен факт значительной величины диагонального члена M_{xy} , характеризующего аномальное поле в B_y компоненте под действием B_x компоненты нормального поля. В трех рассмотренных слабо аномальных пунктах M_{xy} становится максимальной компонентой. Причиной может быть некоторое свойство источника вариаций, которое надо анализировать по более обширному материалу, или влияние погрешностей оценивания, способных накапливаться при пересчете на единую базовую точку. В попытке разобраться был построен рис. 4, в котором те же данные представлены в других координатах — ось " x " направлена на географический север (как при измерениях). Поскольку аномалия направлена под углом 50° к оси x , обе главные компоненты M_{xx} и M_{yy} примерно одинаковы с небольшим преобладанием M_{yy} на большинстве аномальных пунктов, кроме L05 с сильным преобладанием M_{xx} , что и понятно, поскольку азимут аномалии под L05 на $15\text{--}20^\circ$ отличается от среднего регионального азимута. На рис. 4 даны частотные характеристики действительных и мнимых частей компонент тензора M . Моделирование на компактных двумерных провод-

никах показало, что на периоде T_0 максимума действительной части аномального поля мнимая часть изменяет свой знак (что свойственно также и векторам индукции). Такая закономерность довольно отчетливо видна на некоторых пунктах, на других лишь намечается в виде тенденции. Это связано с некоторыми локальными отклонениями от двумерности. Изучать эти нюансы в крупном масштабе следует путем совместного анализа всех данных МВП: реальных и мнимых векторов и компонент тензора на всех периодах, а также данных МТЗ—АМТЗ. На рис. 4, б представлены действительные экстремальные эллипсы совместно с действительными и мнимыми векторами пертурбации Шмукера для двух периодов. Мы не встречали в литературе представления и использования для интерпретации мнимых компонент магнитного тензора. Однако считаем, что поиск адекватных путей их использования стоит продолжить.

Аномальное поведение величины максимальной амплитуды тензора M_a (в направлении 50° к востоку) на Янисъярвинском участке профиля ВС-2 представлено для двух характерных периодов (128 с — экстремум аномалии "В", 1024 — экстремум аномалии "А") на рис. 5, а (искаженный отклик в т. L05 выделен пунктиром). Двумерная часть аномалии (сплошная линия) имеет характерную асимметричную форму, обусловленную падением проводящей зоны на юго-запад. Этот же характер геометрии ЯЯР в общих чертах продемонстрирован на соответствующем фрагменте глубинного геолого-геофизического разреза на всю мощность земной коры [Схема ..., 1998], а также на геоэлектрическом разрезе этого участка профиля, построенном по результатам 3D инверсии ансамбля профильных МТ—МВ данных на всей линии Выборг—Суоярви с привлечением площадных данных МВП по близлежащей территории Финляндии [Таран и др., 2017] (рис. 5, в). Глубинный геоэлектрический образ ЯЯР демонстрирует падающую под углом 35° разломную структуру с интегральной про-

димостью примерно в 5—7 тыс. См. Эти результаты интерпретации МТ и МВ данных существенно корректируют более ранние представления о зоне контакта Карельского кратона и ЛБЗ.

Украинский щит. Тектоника. В работах Г. И. Каляева, Е. Б. Глевасского и недавних публикациях [Азаров и др., 2006; Очерки ..., 2018 и др.] Украинский щит подразделяется на пять мегаблоков. Три из них, Белоцерковско-Среднебугский, Среднеприднепровский и Приазовский, рассматриваются как архейские микроконтиненты. Взаимодействие микроконтинентов с окружающими их в позднем архее—раннем протерозое океаническими структурами породило разделяющие их протерозойские мегаблоки и приграничные шовные зоны. Например, образование Ингульского мегаблока описывается как последовательность широтных сжатий и раздвигов. До 2,6 млрд лет между Среднеприднепровским и Белоцерковско-Среднебугским архейскими микроконтинентами / микроплитами находился океан с тонкой океанической корой. В период 2,4—2,3 млрд лет микроплиты сближаются, происходит складкообразование, погружение пород на глубину и их метаморфизм; в период 2,1—1,75 млрд лет преобладают раздвиговые движения с наложенным знакопеременным горизонтальным и вертикальным массопереносом, включающим эрозионный срез [Азаров и др., 2006, рис. 2.4; Очерки ..., 2018, рис. 2.180]. Формации шовных зон наблюдаются на значительной площади Ингульского мегаблока протерозойского возраста.

Материалы наблюдения МТЗ и их асимптотическая интерпретация. Основные геоэлектромагнитные наблюдения МТЗ на Украинском щите были выполнены и описаны результаты их обработки и интерпретации в 1970—1990 годы в Центральной (Днепропетровск) и Бортничской (Киев) геофизических экспедициях Управления "Укргеология". Работы проводились цифровыми электроразведочными станциями ЦЭС-2, обеспечившими высококачественную регистрацию пяти компонент

ЕМ-поля в диапазоне периодов 0,1—2000 с. В Министерстве геологии действовали жесткие инструкции по проведению полевых работ, требовавшие систематическое эталонирование аппаратуры и контрольные повторные наблюдения на 5 % пунктов. Обработка выполнялась на стационарных ЭВМ по программам Л. И. Томчакова, основанным на вычислении энергетических спектров взаимной и автокорреляции компонент ЕМ-поля и узкополосной фильтрации данных, результаты обработки получались в цифровом виде, но представлялись в отчетах и сохранялись в графическом аналоговом виде: кажущиеся сопротивления, фазы импеданса, типперы (как функции периода), полярные диаграммы, векторы индукции на фиксированных частотах. Полученный в тысячах пунктов МТЗ материал содержит уникальную информацию, и его до сих пор используют многие исследователи для построения геоэлектрических моделей различными методами инверсии. (Сами записи компонент ЕМ-поля были записаны станциями ЦЭС-2 на магнитные ленты, которые по прошествии 10—15 лет рассыпались, первичная информация пропала и повторная обработка не может быть выполнена.) Поэтому на представленных ниже рисунках показаны функции отклика, полученные на профилях, пересекающих интересующий нас AR-PR контакт, и дается приближенная асимптотическая интерпретация, а результаты и возможности моделирования методами 2-3D компьютерной инверсии будут рассмотрены по работам двух ниже указанных групп.

В отчете [Ингеров и др., 1990] представлены кривые МТЗ и МВП на пяти профилях, пересекающих ККР, и дана их геологическая интерпретация. На рис. 6 (см. с. 223) белыми линиями показано положение этих профилей на карте центральной части УЩ, на рис. 7 представлены фрагменты детальных карт с положением пунктов МТЗ на этих профилях, выше их — кривые функций отклика и ниже их — результаты приближенной одномерной интерпретации кривых кажущегося сопро-

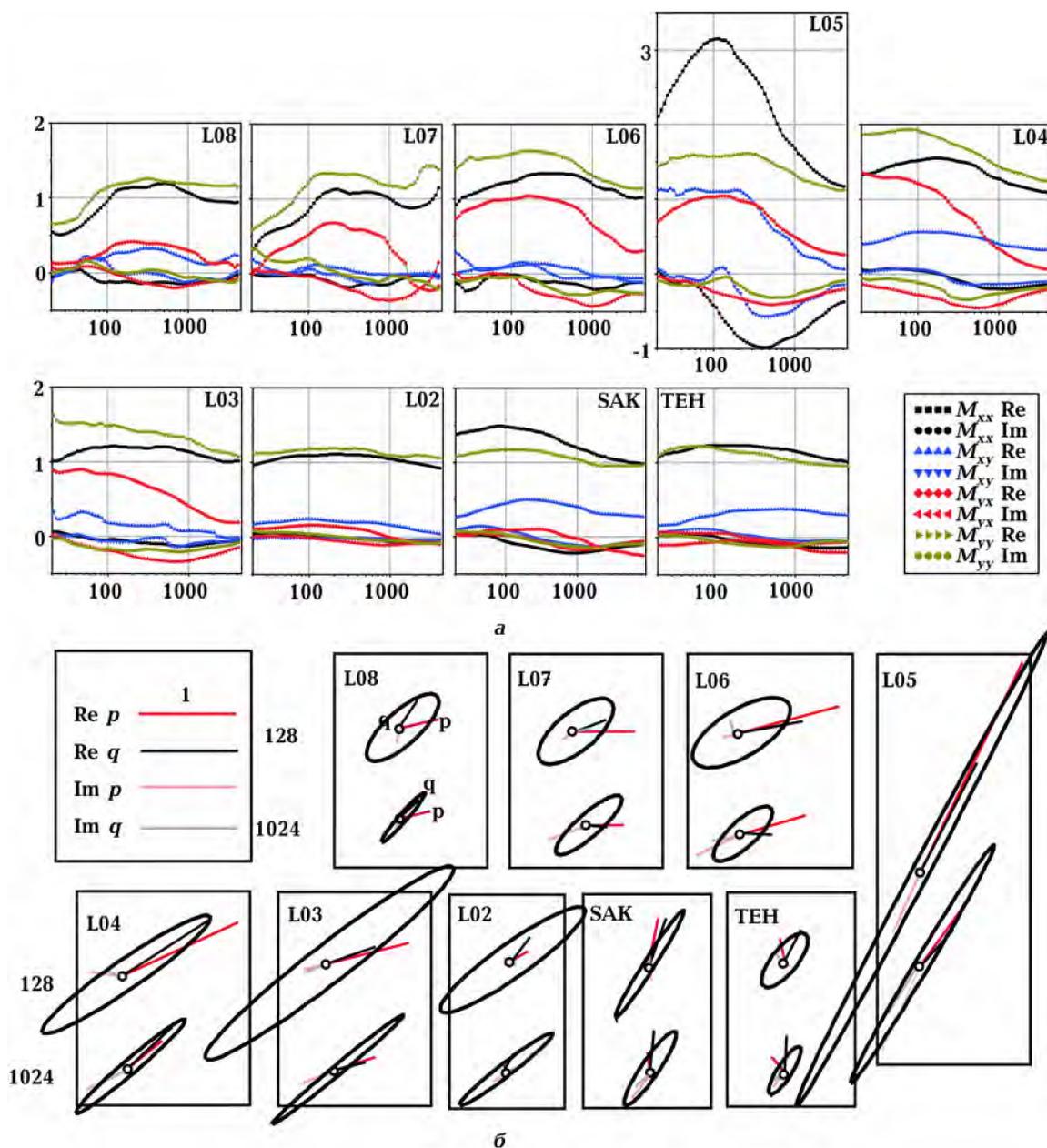


Рис. 4. Частотные зависимости реальных и мнимых частей компонент магнитного тензора M_a в исходных координатах: "x" направлен на север, "y" — на восток для девяти пунктов наблюдений (а), а также экстремальные эллипсы и опыт построения реальных и мнимых векторов пертурбации p и q [Schmucker, 1970; Рокитянский, 1975, с. 80] для периодов 128 и 1024 с (б).

тивления ρ_k . Если на кривых наблюдались нисходящие участки с последующими восходящими участками (или намеком на них), то оценивалась глубина кровли корового проводника и его суммарная проводимость, приближенно полученные в рамках формальной одномерной интерпрета-

ции по асимптотическим формулам [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Закономерность изменения формы и уровня кривых МТЗ по всем профилям, несмотря на осложнения, вносимые локальными структурами, в целом соответствует модели проводящего пласта, наклон-

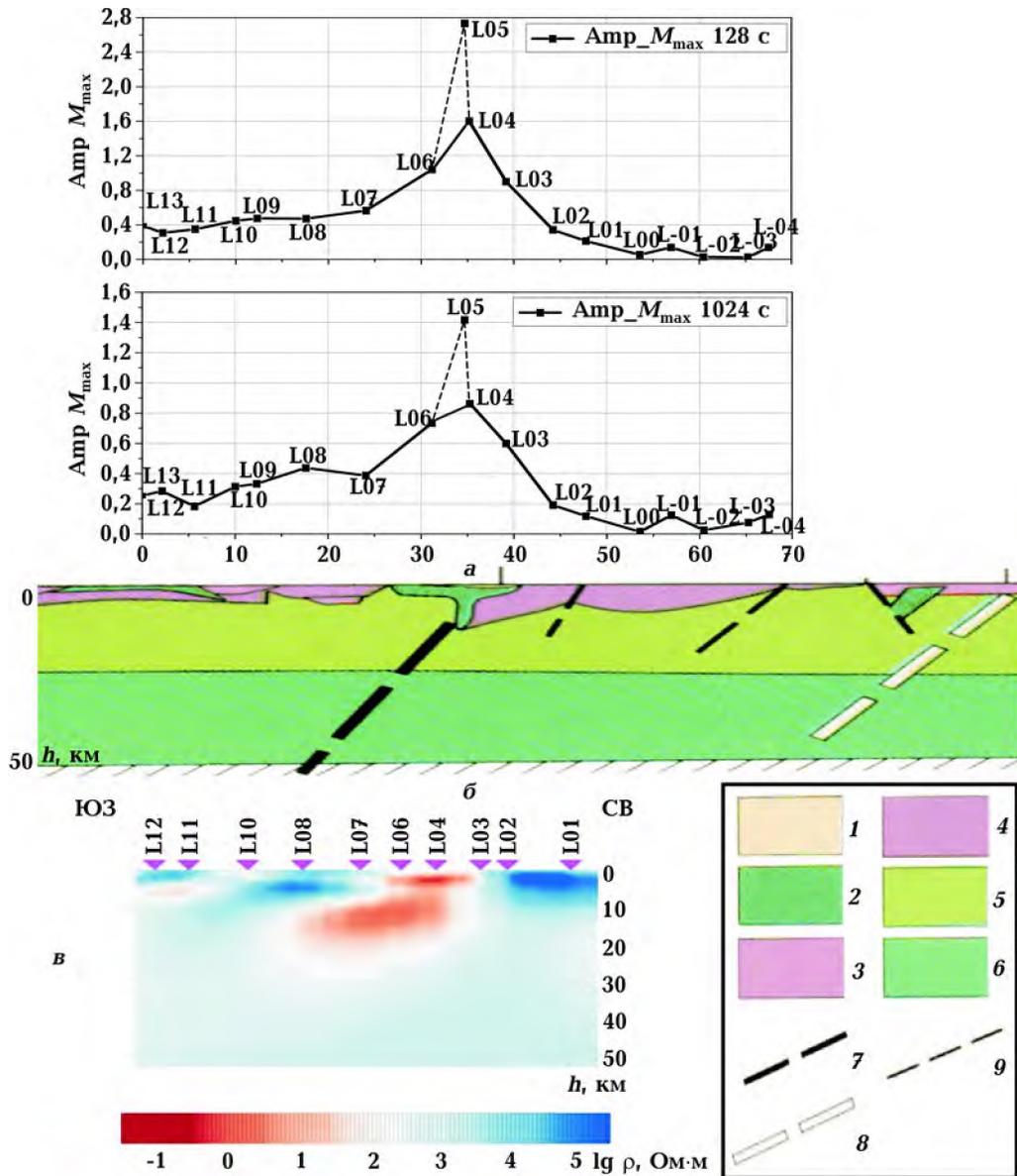


Рис. 5. Профильные зависимости оценок максимальной амплитуды тензора M_a (в направлении 50° к востоку) для двух периодов на Янисъярвинском участке профиля ВС-2 (а) и фрагмент глубинного геолого-геофизического разреза земной коры зоны контакта ЛБЗ и Карельского кратона [Схема ..., 1998] (б): 1 — метаосадки и метавулканисты; 2 — основные интрузии; 3 — гранитогнейсы; 4 — гранодиориты; 5 — “диоритовый” слой; 6 — “перидотит-базальтовый” слой. Предполагаемые глубинные разломы: 7 — сквозькоровые, разграничивающие структуры 1-го порядка; 8 — сквозькоровые и внутрикоровые разграничивающие структуры 2-го порядка; 9 — прочие, выделенные по геофизическим данным; геоэлектрический разрез зоны контакта AR-PR по результатам 3D инверсии ансамбля профильных МТ—МВ данных по линии ВС-2 [Таран и др., 2017] (в) (сжатие по оси h — 1 : 2).

но погружающегося в западном направлении между высокоомным Среднеприднепровским мегаблоком на востоке и более проводящими Ингульским (Кирово-

градским) мегаблоком и Западно-Ингульско-Криворожско-Кременчугской шовной зоной (ЗИККШЗ) — на западе. Средняя продольная проводимость верхнего

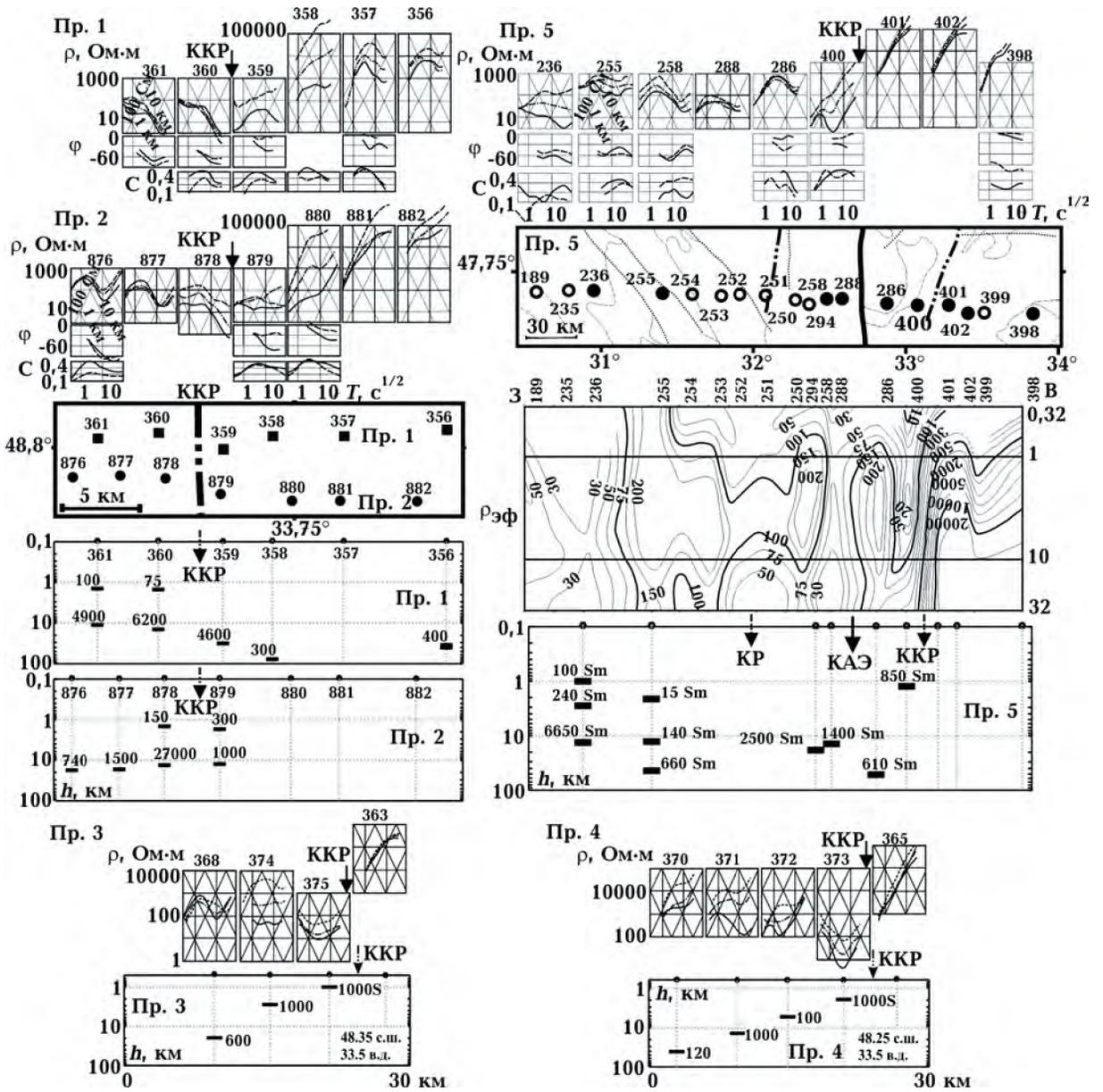


Рис. 7. Кривые и результаты МТЗ вдоль пяти пересечений (представленных на рис. 6 белыми линиями) Криворожско-Кременчугского разлома (ККР). Пояснения и обозначения даны для самого южного регионального профиля "Пр. 5" Новоукраинка—Кривой Рог. Псевдоразрез $\rho_{\text{эф}}$ получен по всем приведенным на карте пунктам МТЗ. Кривые кажущегося сопротивления ρ , фазы импеданса φ и компонент реальной части вектора индукции C , а также их одномерная интерпретация проводящими площадками с указанием продольной проводимости в Сименсах (нижние графики для каждого профиля: по оси абсцисс — расстояние вдоль профиля в линейном масштабе, по оси ординат — глубина до проводника в км в логарифмическом масштабе) даны только для пунктов, представленных на карте залитыми кружками. Северная компонента кривых МТЗ дана сплошной линией, восточная — пунктирной, эффективная — штрихпунктирной. Обозначения и стиль представления материалов на профилях 1—4 аналогичны.

осадочного слоя выветривания неогенового возраста в этой части УЩ равна 10 См с резкими локальными вариациями от долей до десятков Сименсов. В самом до-

кембрийском фундаменте западнее ККР в протерозойских отложениях встречаются разнообразные породы, обогащенные графитом и полиметаллическим орудене-

нием, которые образуют разномасштабные проводники (графитоносные гнейсы, графит и графитовые пленки, сульфиды ...). Эти проводники обуславливают уровень и форму кривых МТЗ. В отчете [Ингертов и др., 1986] на с. 209 дан рис. 44, на котором начерчены известные графитизированные гнейсы, простирающиеся вдоль ККР на десятки километров, и даны изолинии эффективного кажущегося сопротивления, оконтуривающие эти хорошо проводящие породы. В работе [Логвинов, 2012] на с. 232 дан рис. 5.9 с обобщенными данными о графитизированных породах на УЩ и самая контрастная аномалия электропроводности выделена именно немного западнее ККР на глубине 0,6—1,8 км.

Криворожско-Кременчугский разлом на всех пересечениях проявляется как весьма широкая зона (1—2 км шириной) пониженных значений удельного сопротивления (30—300 Ом·м) в верхней части разреза. На глубине 1—3 км удельное сопротивление снижается от 10 до 1 Ом·м и менее. Детальные электроразведочные работы несколькими методами постоянного и переменного поля свидетельствуют о сложном фрагментарном строении ККР как вкрест, так и вдоль его простираения. С удалением от ККР вглубь протерозойского мегаблока кривые МТЗ обнаруживают проводники на все большей глубине, что хорошо видно на профилях 2 и 3. Этот результат можно бы было интерпретировать как погружение проводящего слоя и делать соответствующие тектонические построения. Однако на других профилях закономерное погружение не наблюдается. Наблюдаются резкие изменения глубины и проводимости корового проводника, иногда невозможные согласно теории МТЗ. Кривые смещены искажениями. Регистрация на длинных периодах, необходимая для привязки кривых к нормальному разрезу МВЗ, отсутствует. Остается группирование МТЗ, которое и использовалось для определения глубины верхней кромки коровых проводников, включая КАЭ.

На Среднеприднепровском мегаблоке архейского возраста проводники не наблюдаются. Подробнее об этом в следующем разделе.

Результаты моделирования. 1-2D инверсия и попытки пленочного квази-3D и 3D моделирования в основном по данным МТЗ "Укргеологии" 1970—1990 гг. были выполнены двумя группами геоэлектриков: 1) С. Н. Кулик, Т. К. Бурахович и другие (их основная публикация по интересующему нас вопросу [Азаров и др., 2006]) и 2) И. М. Логвинов, В. Н. Тарасов и другие (их три основные работы по нашей теме будут перечислены ниже). На рис. 8 и 9 даны материалы, отобранные для обсуждения из работы [Азаров и др., 2006] (на рис. 9 даны и результаты второй группы): псевдоразрезы и результаты 1D инверсии эффективных кривых кажущегося сопротивления вдоль четырех профилей. На всех виден переход от высокоомных (до 10^5 Ом·м и выше) пород Приднепровского мегаблока до относительно хорошо проводящих пород на ЗИККШЗ и Ингульском мегаблоке, и этот переход происходит именно на ККР. Все это видно и непосредственно на псевдоразрезах эффективного сопротивления (а значит, и на кривых МТЗ), представленных на рис. 8. В работе приводятся также результаты измерений 2002—2003 гг. новой аппаратурой LEM-410M системы Корепанова на двух профилях в северной части ЗИККШЗ контакта AR-PR на территории УЩ. На разрезе, полученном вдоль широтного профиля LEM-1 на широте 48,8° с. ш. (см. рис. 6), западнее ККР в толще протерозойских отложений фиксируются обширные высокоомные участки без коровых проводников, по-видимому находящиеся на интрузивах, сложенных гранитоидными породами. На профиле АМТЗ-2, расположенном на границе сочленения УЩ с Днепровско-Донецкой впадиной, авторы дают геоэлектрический разрез до глубины 30 км, на котором западнее ККР на глубине 3—7 км и до предельных 30 км дан проводник с удельным сопротивлением менее 30 Ом·м (см. рис. 8, верхний

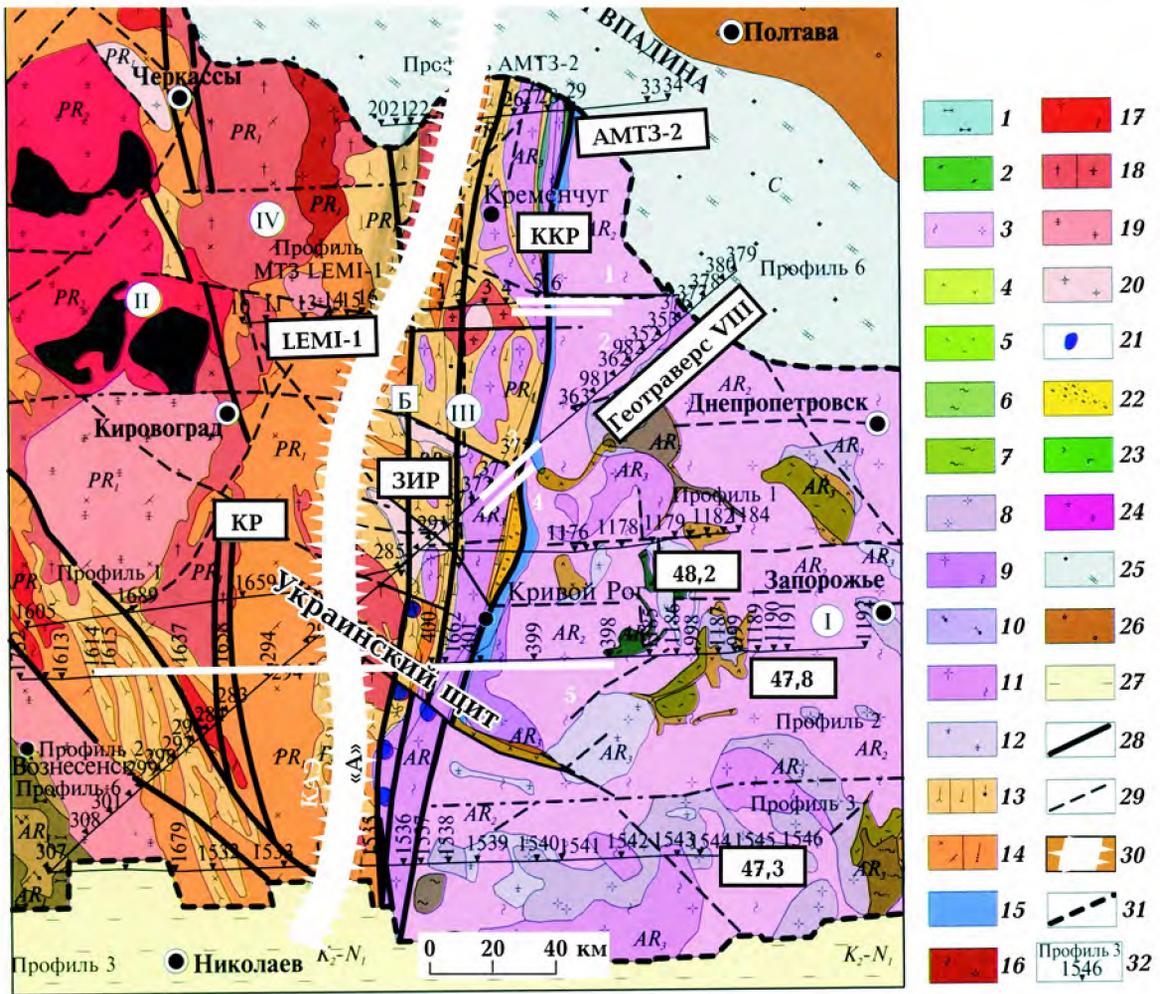


Рис. 6. Расположение профилей МТЗ в центральной части УЩ (адаптировано по [Азаров и др., 2006, рис. 6.1] с небольшими добавлениями и переименованиями). Мегаблоки и шовная зона (римские цифры в кружках): I — Среднеприднепровский, II — Ингульский, III — Западно-Ингулеcko-Криворожско-Кременчугская шовная зона (ЗИККШЗ). Основные разломы: Криворожско-Кременчугский (ККР), Западно-Ингулецкий (ЗИР), Кировоградский (КР). Геологические формации 1—27 — см. надпись к рис. 6.1 [Азаров и др., 2006]; 28 и 29 — региональные и локальные разломы; 30 — ось основного проводника КАЭ "А" по данным МВП на периодах 500—2000 с [Рокитянский, 1975; Рокитянский и др., 2012] с небольшими уточнениями из недавних работ И.М. Логвинова (центр объекта "А" на рис. 9); 31 — границы УЩ; 32 — профили и пункты МТЗ.

разрез "50,2° с. ш."). Примерно в этом месте проходит ось КАЭ. Если интерпретация верна, то получен важный результат: глубина верхней кромки аномалии всего примерно 5 км. К сожалению, авторы ничего не пишут, по каким компонентам функций отклика и как делалась инверсия, причем высокая детальность полученного разреза не соответствует густоте пунктов наблюдения. Восточнее ККР над Приднепровским мегаблоком авторы

фиксируют высокоомный разрез до десятков тысяч Ом·м, однако под двумя самыми восточными пунктами в толще архейского Среднеприднепровского мегаблока показаны хорошо проводящие участки на глубине порядка 15 км. Однако этот результат мог получиться благодаря боковому влиянию близлежащих осадочных толщ ДДВ с проводимостью более 1000 См.

В работе [Азаров и др., 2006] представлены также квазитрехмерные модели, по-

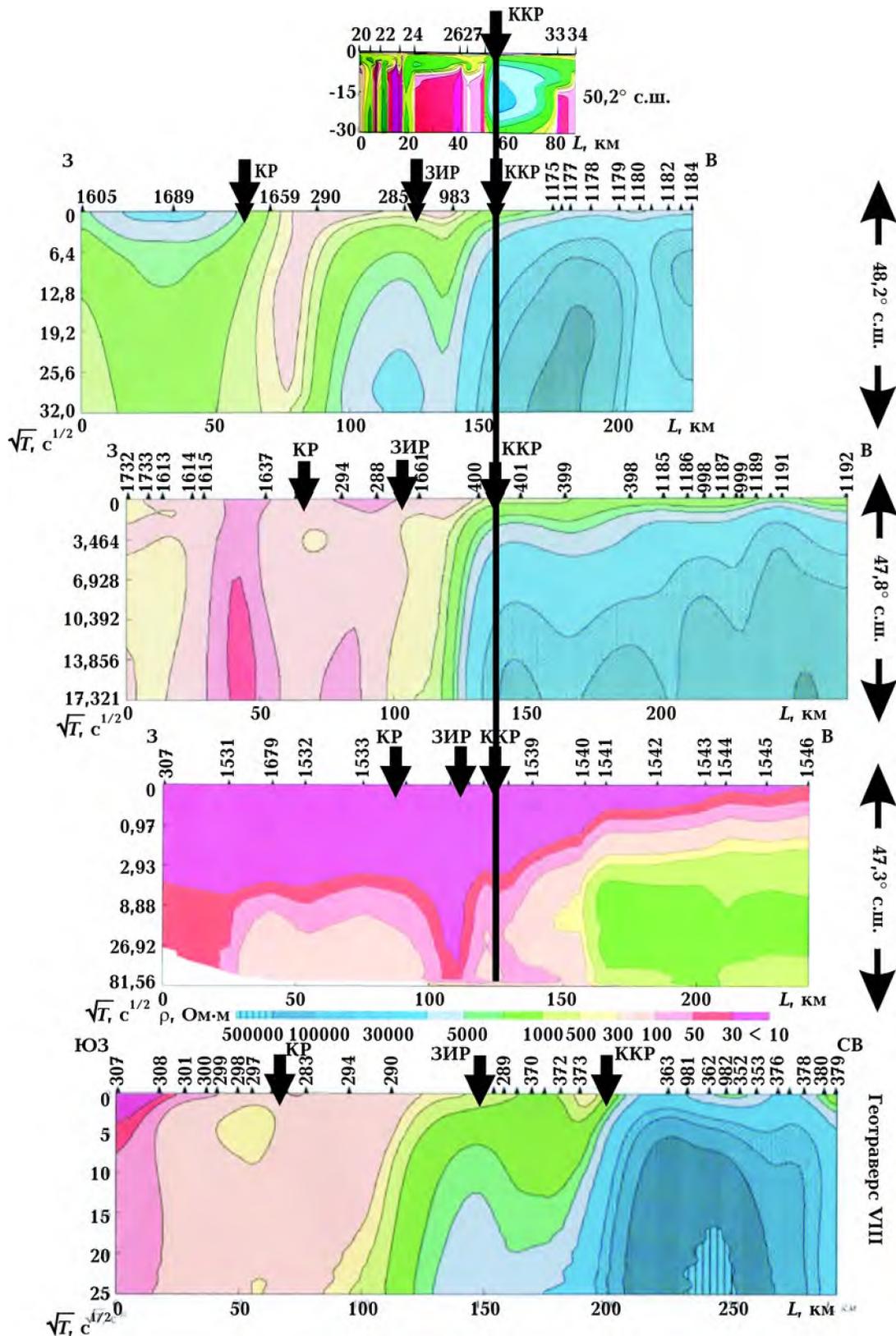


Рис. 8. Псевдоразрезы эффективного кажущегося сопротивления вдоль четырех региональных профилей, пересекающих ККР — границу AR-PR (рис. 6.3—6.6 работы [Азаров и др., 2006]). Как и в оригинале, на трех верхних разрезах корень из периода дан в логарифмическом масштабе, на нижнем — в линейном. На самом верхнем рисунке "50,2° с. ш." дан геоэлектрический разрез вдоль профиля АМТЗ-2, глубины отложены в км [Азаров и др., 2006, рис. 6.19].

лученные по программе пленочного моделирования, однако адекватность представленных моделей вызывает сомнения. Так, на с. 113 авторы пишут, что замена реальных объектов эквивалентной пленкой обеспечивает расчет только в низкочастотной области, когда уже не существует скин-эффект и индуцированные токи полностью насыщают аномальный объект высокой электропроводности. Это правильно. Однако на с. 114 пленочное моделирование применяется для интерпретации высокопроводящей Кировоградской аномалии на периодах 150 и 2000 с. На 150 с ими получено пять отдельных высокопроводящих фрагментов, поскольку "на коротких периодах индукция возникает в наружных частях неоднородного проводника, а при увеличении периода поле проникает в более глубокие его горизонты", но это означает, что не выполняется условие применимости пленочных моделей, изложенное выше самими авторами. Далее, исходя из конфигурации пленочной модели, строится стартовая модель для расчета прямой задачи по 3D программе Макки. После трех итераций подбора сближение данных расчета и наблюдения приостановилось, что указывает на внутреннюю противоречивость/несовместность ансамбля использованных данных наблюдения, возможно, также и априорных данных (например, принятого нормального разреза).

И.М. Логвинов с коллегами собрал большую базу данных в виде функций отклика, полученных производственными организациями и в Академии. Для построения геоэлектрических моделей он использует прямую инверсию данных, однако в публикациях эти данные приводятся в очень ограниченном объеме, что зачастую не позволяет читателю убедиться в правильности выбора стратегии инверсии и ее результатов. По интересующему нас району результаты конкретной интерпретации группой И.М. Логвинова представлены в трех главных работах [Логвинов, Тарасов, 2005, Гордиенко и др., 2005; Логвинов, 2012]. Рассмотрим некоторые из приведенных в них результатов. Трудность и неопреде-

ленность 2D инверсии сначала проиллюстрируем примерами интерпретации данных вдоль широтного профиля на $48,2^\circ$ с. ш.

На рис. 2.10, Б-Б работы [Гордиенко и др., 2005] и на рис. 3, профиль Б работы [Логвинов и Тарасов, 2005] Кировоградская аномалия представлена в виде двух частей: западной "А" и восточной "Б", причем последняя на десятки км выдвинута под Среднеприднепровский мегаблок архейского возраста, показывая там крупный проводник с сопротивлением меньше 3 Ом·м. Однако об этом результате в тексте сказано: "К сожалению, отсутствие данных на 60-м км отрезке профиля между пунктами ИСК и ЛЕН не позволяет построить *обоснованную* модель для этого участка. Один из вариантов, уменьшающий величину невязки в пунктах ВДН и ИСК, предусматривает наличие проводящего объекта (Б) в районе ПК84-112 в интервале глубин 28—42 км с G порядка $1,9 \cdot 10^8$ См·м" [Логвинов, Тарасов, 2005, с. 763, предпоследний абзац]. И далее: "По кривым МТЗ глубинный проводящий объект в районе ПК82-110 не виден вообще" [Там же, с. 764]. Но объект "Б" остается во всех результатах. В более поздней работе объект "Б" дается с другими параметрами: глубина кровли — 9 км, $G = 0,03 \cdot 10^8$ Ом·м, ПК180—192 [Логвинов, 2012, табл. 4.7 на с. 198]. Почему изменился результат, нигде не объяснено. Новых наблюдений МВП и МТЗ на этом профиле не было.

В работах 2005 г. основной проводник КАЭ — объект "А" хорошо определяется по данным МВП и 30 МТЗ и его продольная проводимость G оценивается величиной $4 \cdot 10^8$ См·м. Однако в 2012 г. высказывается озабоченность сложностью поведения функций отклика МТЗ над осью аномалии (над объектом "А") для этого профиля [Логвинов, 2012, с. 184—186] и в таблице на с. 198 значение G объекта "А" уменьшено до $0,9 \cdot 10^8$ См·м, т. е. в 4,5 раза. Новых наблюдений не было. По-видимому, автор сделал несколько иной выбор пунктов/кривых МТЗ из имеющегося множества. Но это означает присут-

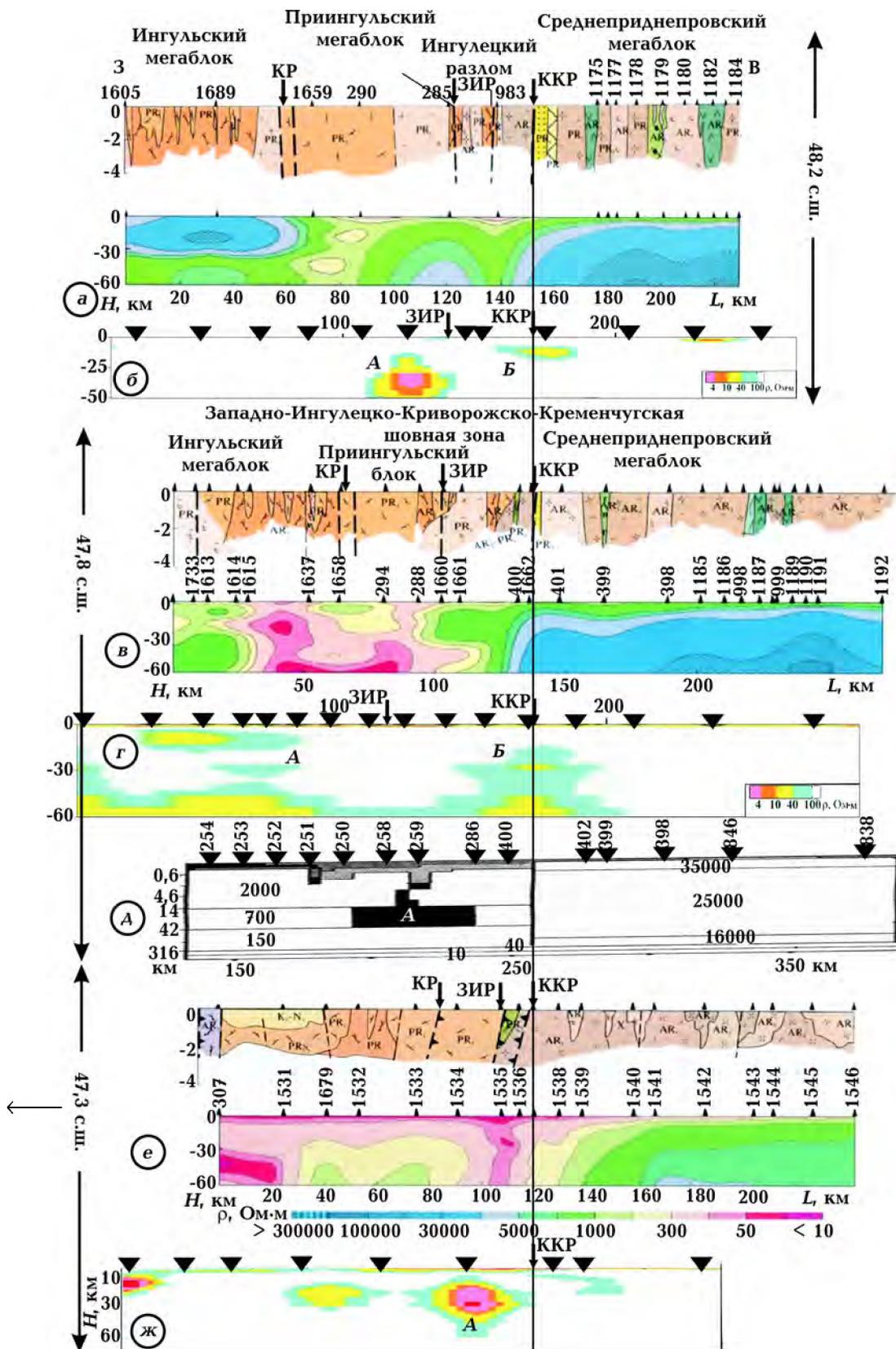
стве субъективного фактора в результатах 2D инверсии.

В работах И. М. Логвинова двумерная инверсия выполнена вдоль трех широтных профилей на УЩ на широтах 47,3, 47,8 и 48,2 с. ш., т. е. примерно там же, где проходят профили 3, 2, 1 в работе [Азаров и др., 2006], показанные на рис. 6. На рис. 9 даны итоговые разрезы электропроводности вдоль трех указанных профилей, полученные в этих двух работах. Различия существенные. Во-первых, форма представления: у Азарова детальная шкала сопротивлений от 300 000 до 10 Ом·м, у Логвинова от 100 до 4 Ом·м, т. е. он показывает только хорошо проводящие аномалии. Во-вторых, использован не совсем идентичный материал: Логвинов использовал типпер, а также поперечные и продольные кривые МТЗ, Азаров, по-видимому (это в книге прямо не сказано), использовал только эффективные кривые МТЗ, инвариантные к выбору оси двумерности, что упрощает и стабилизирует инверсию, но лишает возможности получения более детальных, хотя и не всегда более обоснованных результатов. Наконец, выбор пунктов не одинаков: из множества пунктов МТЗ, полученных в Укргеологии, каждая группа исследователей или даже одна группа в разные годы исследования (моделирования) выбирали различные пункты (например, пункты, казавшиеся менее искаженными помехами и геологическими неоднородностями, причем выбор мог быть чисто субъективным) для формирования номинально идентич-

ных профилей (например, вдоль некоторой определенной широты).

Итак, рассмотрим рис. 9. Все приведенные на нем профили пересекают КАЭ и результаты инверсии должны согласованно показывать этот объект. Они показывают, но с нереальными смещениями в западном или восточном направлениях. Такие смещения наблюдаются для результатов обеих групп авторов, и по представленным материалам трудно определить, какая из работ дает более правильный результат. Вдоль профиля 47,8° И. М. Логвинов [2012] получил результат, который озадачил его самого: "Объект "Б" выделяется четко, сложнее с объектом "А". Если принять за него серию объектов западнее ПК100, то тогда надо признать, что объект почти на 50 км отклонился к западу от положения его оси на предыдущем профиле. В этом случае никакой связи объекта "А" с ИККШЗ не наблюдается, что противоречит данным моделирования на профилях, расположенных севернее и южнее" [Логвинов, 2012, с. 187]. Интересно отметить, что в работе [Гордиенко и др., 2005, рис. 2.7 на с. 36] была дана совершенно другая интерпретация того же профиля, представленная на рис. 9-д: КАЭ получилась в виде одного объекта "А" с центром на расстоянии всего 48 км от ККР, восточнее которого породы Среднеприднепровского мегаблока до глубины 100 км имеют удельное сопротивление более 25 000 Ом·м без каких-либо хорошо проводящих включений. Это — важный результат, характеризующий гео-

Рис. 9. Результаты моделирования вдоль трех квазиширотных профилей, пересекающих КАЭ, ЗИККШЗ и ККР на широтах 47,3°, 47,8° и 48,2° с. ш. по следующим источникам: разрезы *a*, *v* и *e* [Азаров и др., 2006]; разрезы *б*, *г* и *ж* [Логвинов, 2012]; разрез *д* [Гордиенко и др., 2005]. На разрезах *a*, *v* и *e* приведены также геологические разрезы верхних 3 км с указанием разломов и геологических формаций; геоэлектрические разрезы даны до глубины 50 км; общая для трех профилей *a*, *v*, *e* шкала удельных сопротивлений дана только на нижнем профиле *e*, над разрезами написаны номера пунктов МТЗ (данные Укргеологии). На разрезах *б*, *г*, *ж* выделены только хорошо проводящие образования с удельным сопротивлением менее 100 Ом·м — это, в первую очередь, два проводника, из которых состоит КАЭ: западный объект "А" — основной с большой суммарной проводимостью ($G > 10^8$ См·м) и глубиной более 15 км и восточный объект "Б" — менее проводящий и менее глубинный (по нашему предположению, приуроченный к ККР). Совмещение всех разрезов произведено по Криворожско-Кременчугско-Крупецкому разлому (ККР), через который проведена сплошная линия.



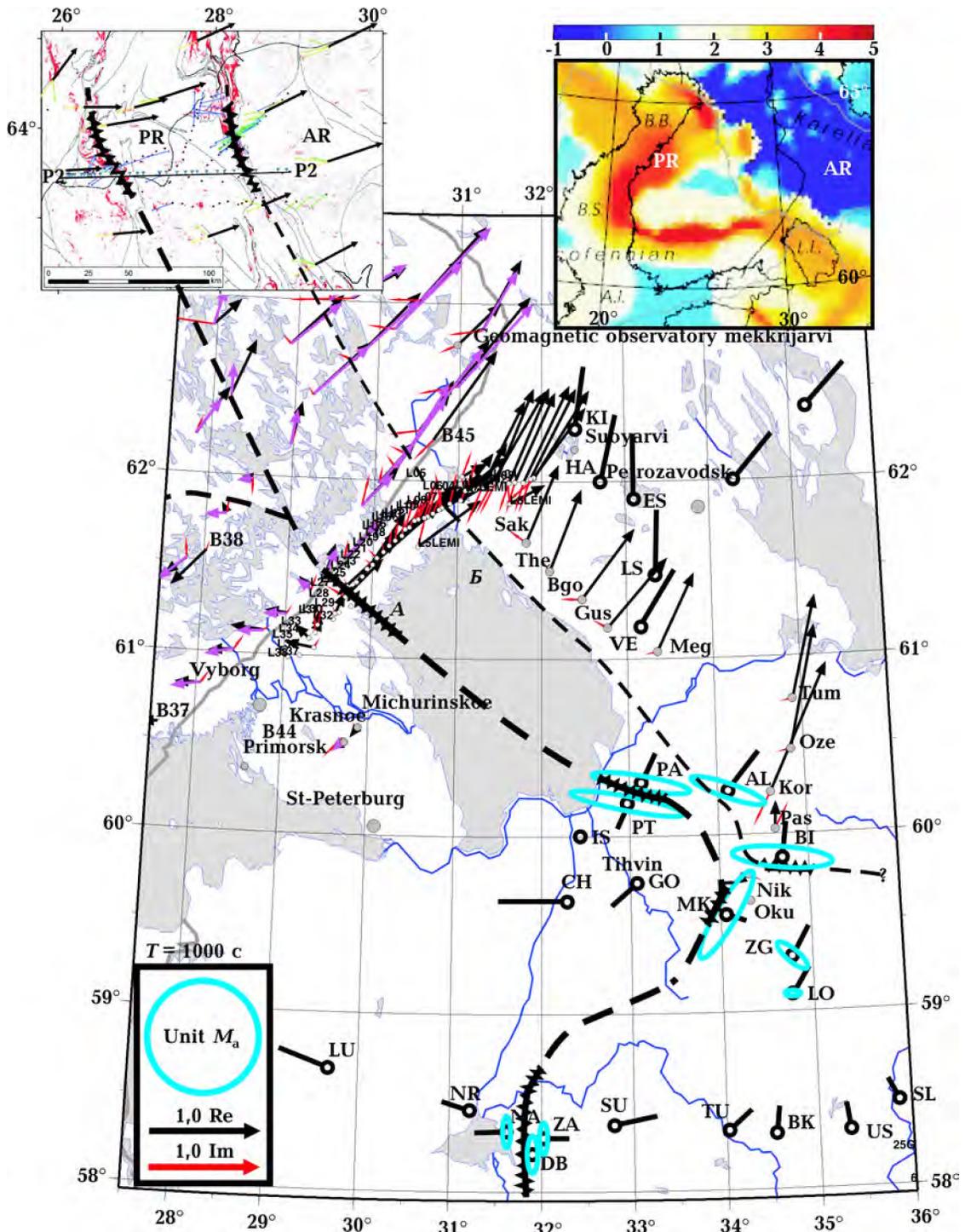


Рис. 10. Гипотезы продолжения ЛАЭ в северо-западном, юго-восточном и южном направлениях.

На врезке в левом верхнем углу, заимствованной с рядом изменений из работы [Vaittinen et al., 2012, Fig. 3], показан один (P2-34 пункта) из трех сложносостроенных для 2D инверсии профилей МТЗ. Геоэлектрический разрез для профиля P2, полученный в результате 2D инверсии, и карта всех пунктов трех профилей показаны на рис. 11, а.

На врезке в правом верхнем углу дан фрагмент карты интегральной продольной проводимости S (в $\lg \text{ СМ}$) слоя земной коры на глубине от 10 до 30 км [Korja et al., 2002].

На основном рисунке представлены реальные (черные) и мнимые (красные) векторы индук-

электрическую модель архейского мегаблока на УЩ.

Сложность материала, противоречивость поведения функций отклика в близлежащих пунктах, отсутствие теоретически доказанных точных критериев селекции данных в реальных трехмерных ситуациях — все это объективные факторы, затрудняющие получение хорошо обоснованных результатов интерпретации материалов глубинной геоэлектрики. При анализе данных глубинной геоэлектрики необходимо предъявлять определенные требования к качеству материала и использовать набор методик анализа функций отклика для определения степени их соответствия 2D идеализации и пригодности для 2D инверсии, но и их применение не решает проблему исчерпывающе, что может быть проиллюстрировано на примере хорошей работы [Vaittinen et al., 2012].

Итоги анализа материалов на УЩ. На Среднеприднепровском мегаблоке архейского возраста крупных хорошо проводящих объектов не обнаружено. Вся толща земной коры имеет удельное сопротивление более 1000 Ом·м. Кривые МТЗ, псевдоразрезы и результаты 1-2D инверсии дают величины в десятки и сотни тысяч Ом·м. Однако эти результаты могут быть завышены: во-первых, региональным эффектом "S" — перетеканием и/или обтеканием токов между хорошо проводящими осадочными бассейнами — ДДВ на севере и Причерноморской впадиной на юге. Пленочное моделирование показало, что этот эффект может завышать кривые ρ_k примерно на порядок [Рокитянский и др., 2012]. Второй причиной завышения ρ_k может быть преобладание помех над

МТ полем. На данном этапе исследований можно принять в качестве приближенной оценки удельного сопротивления земной коры Приднепровского блока 25 000 Ом·м согласно результату И. М. Логвинова [Гордиенко и др., 2005, рис. 2.9-В].

Кировоградская аномалия (КАЭ). Положение ее оси на раннем этапе исследований определялось по данным МВП, причем использовались и вертикальная компонента (векторы индукции), и аномальное поле в горизонтальных компонентах с нормировкой к обсерватории "Дымер". Данные МВП слабочувствительны к глубине аномального проводника — они дают только оценку максимально возможной глубины до центра аномальных токов — для КАЭ это 35 км [Рокитянский, 1975]. Для уточнения глубины залегания аномалии необходимы методы зондирования — МТЗ, но с их применением возможны различные осложнения. Так, на Южно-Украинской моноклинали (ЮУМ) происходит экранирование сигнала от глубинного проводника нарастающей толщиной осадочного чехла над наклонно погружающейся поверхностью кристаллического фундамента. Этот эффект был промоделирован и объяснен Бердичевским и Дмитриевым еще в 1970-х. Специально выполненные наблюдения МТЗ над осью КАЭ показали, что под ЮУМ кривые МТЗ "не чувствуют" присутствия КАЭ [Дьяконова и др., 1986]. Подобные эффекты на щите возможны на более локальных участках. Глубины, определяемые до проводящего тела КАЭ методом МТЗ, изменяются на УЩ от пункта к пункту, что обусловлено, главным образом, приповерхностными неоднородностями. На данном этапе по дан-

ции по области ЛАЭ на периоде 1024 с: на Российской территории по материалам Рабочей группой LADOGA 2013—2016 гг. [Соколова и др., 2017], на территории Финляндии — по материалам [Rajunpää et al., 1983; Rajunpää, 1987] (розовым цветом даны векторы Паркинсона, повернутые на 180°). Черными отрезками без стрелок, исходящими из пунктов наблюдений, изображенных кружками с двухбуквенными латинскими названиями, даны векторы Визе для интервала периодов 10—60 мин. по данным [Рокитянский и др., 1982, 1981]. В пунктах с увеличенным полем горизонтальных компонент геомагнитных вариаций приведены приближенно оцененные эллипсы аномальных токов. Масштаб векторов индукции задан длиной показанных единичных стрелок, а масштаб эллипсов — окружностью единичного радиуса.

ным старых МТЗ Укргеологии более надежно усреднять глубины по группе пунктов и давать средний результат группового МТЗ для некоторого участка КАЭ. Глубины верхней кромки КАЭ изменяются от 10 до 25 км. Средняя глубина по оценке КАЭ определяется 18 км [Логвинов, 2012, с. 198] и 15 км [Рокитянский и др., 2012], что в пределах погрешности совпадает. Характерное для КАЭ на УЩ отсутствие систематического расхождения продольных и поперечных кривых можно объяснить сложной структурой аномалии. В отчете [Ингеров и др., 1990, рис. 4.22—4.25] даны результаты расчетов нескольких двумерных моделей, описывающих характерные особенности кривых МТЗ над КАЭ.

Криворожско-Кременчугский разлом (ККР) по всей длине трассируется как проводящая зона "Б", уходящая на глубину в западном направлении. Является ли она непрерывной и соединяется ли с основной аномалией "А" КАЭ — сейчас трудно сказать. Чтобы дать ответ на эти вопросы, необходимы детальные профильные данные МТЗ—МВП, предпочтительно с определением тензора М аномального горизонтального поля, несущего наиболее достоверную локальную информацию о распределении аномальных токов.

О возможности трассирования Трансевропейской аномалии электропроводности. В литературе, на основе анализа геологических, геофизических и космогеологических материалов высказываются идеи о существовании древнего трансрегионального тектонического линейamenta, простирающегося от Балтийского щита до Украинского щита и даже до Средиземного моря [Быстревская и др., 1985; Грачев, 1987; Глубинное ..., 2004; Орлюк, Пашкевич, 2012; Пигулевский, 2012; Жамалетдинов, Кулик, 2012]. Выявление трансрегиональной цепи аномалий электропроводности, в частности связанных с зонами сочленения архейских и протерозойских блоков, могло бы быть ценным вкладом в разработку этой идеи. Рассмотрим ряд накопленных за последние десятилетия свидетельств о

продолжении аномальнопроводящих объектов ЛАЭ и КАЭ за пределы их первоначально открытых звеньев.

Северное продолжение ЛАЭ. После обнаружения Ладожской аномалии в России в Финляндии в 1981—1984 гг. было выполнено шесть площадных съемок тридцатью синхронно пишущими трехкомпонентными магнетометрами Гафа—Рейцеля с записью на фото пленку в течение 2 месяцев с расстоянием между пунктами от 20 до 60 км. В итоге вся центральная и южная Финляндия была покрыта наблюдениями [Rajunprää, 1987]. В результате обработки были получены векторы Паркинсона для периодов от 100 до 4500 с и в ограниченном количестве эллипсы поляризации горизонтального поля. Поведение векторов выявило четыре аномалии электропроводности. Частотные характеристики аномалий МВП не изучались. По данным немногих пунктов МТЗ был сделан вывод, что аномальные проводники находятся на глубине более 5 км. В более поздней обобщающей работе [Korja et al., 2002] представлены карты суммарной продольной проводимости S Балтийского щита для трех интервалов глубин: 0—10, 10—30 и 30—50 км, большая часть аномальной проводимости помещена в интервал 10—30 км (см. рис. 10, врезка в правом верхнем углу). На рис. 10 (см. с. 228) в верхней его части представлены векторы индукции (уже в конвенции Визе) на территории Финляндии. Врезка в левом верхнем углу взята из работы [Vaittinen et al., 2012], в которой детально исследуется AR-PR контакт в ЛБЗ на территории Центральной Финляндии. Правый проводник, показанный на рис. 11, а, по видимому, находится близ самого AR-PR контакта, поэтому на рис. 10 мы предположительно соединили его с проводником "Б" ЛАЭ. Векторы индукции не противостоят такому соединению. Что касается расположенного на 90 км западнее второго максимума проводимости, то его соединение с проводником "А" ЛАЭ можно предположить, принимая во внимание линейный характер ЛБЗ, ее трассирова-

ние цепочкой аномалий коровой электропроводности [Korja et al., 2002], а также близкое по величине расстояние между проводниками "А" и "Б" на профиле Выборг—Суоярви (тоже 80—90 км). Упоминаемая карта интегральной коровой электропроводности Балтийского щита и поведение векторов индукции на прилегающей к Северному Приладожью территории Финляндии [Rajunpää, 1987] совместно с анализом геологических данных [Минц, Соколова, 2018] позволили выявить связь проводника "А" ЛАЭ также и с ответвляющейся от него интенсивной и протяженной (около 500 км) Южно-Финляндской (ЮФ) аномалией, ассоциированной с Южно-Финляндским гранулитовым поясом и черносланцевым поясом Тампере в пределах Свекофеннского аккреционного орогена (см. рис. 10, врезка в правом верхнем углу; рис. 12).

На рис. 11 сопоставляются два геоэлектрических разреза ЛБЗ, полученных по данным МТЗ. В работе [Ковтун и др., 1998] интерпретация была одномерная с использованием одной из разумно выбранных компонент кажущегося сопротивления — продольной, поперечной или детерминанта — наиболее близкой к глобальной кривой МВЗ на длинных периодах. Полученные глубины до верхней кромки хорошо проводящего тела не превышали 10 км, а местами приближались к поверхности. Разрез вдоль профиля P2 [Vaittinen et al., 2012] получен после отбраковки нескольких пунктов профиля, данные которых не соответствовали критериям двумерности. В итоге для 2D инверсии были использованы оставшиеся 34 пункта. Аномальный проводник у бортов ЛБЗ близок к поверхности и местами выходит на нее, в центральной части проводник погружается на глубину более 20 км. Контур полученного проводника адекватно отображается в структурных линиях соответствующего сейсмического разреза МОГТ эксперимента FIRE. Данная успешная кросс-верификация сейсмического и магнитотеллурического методов обсуждается в работе [Минц, Соколова, 2018] и служит ав-

торам основанием для построения ряда геотектонических выводов, а также подтверждает возможность погружения аномальнопроводящих метаосадков и метавулканитов Свекофеннского орогена и графитсодержащих комплексов Южно-Финляндского гранулитового пояса с поверхности, где они отмечаются обнажениями, до больших, как минимум среднекоровых, глубин. При этом интегральная проводимость коры в области проводника "А" достигает порядка 10 000 См.

Южное продолжение ЛАЭ. Векторы индукции для пунктов в юго-восточном Приладожье представлены на рис. 10 по материалам рабочей группы LADOGA [Соколова ..., 2017] и по данным работы [Рокитянский и др., 1982]. По материалам последней работы построены эллипсы аномальных токов, наиболее отчетливо показывающие, что на юго-восток от Ладожского озера в районе 60° с. ш. ЛАЭ разветвляется на две аномалии: одна чуть южнее пункта VI уходит на восток, вторая, круто повернув на юго-запад через пункт МК, предположительно направляется к оз. Ильмень. Ильменская аномалия установлена очень надежно: смена знаков векторов Визе, увеличение восточной компоненты горизонтального геомагнитного поля на 30—40 % в трех пунктах над осевой зоной. Над осью аномалии выполнено МТЗ в пункте DV. Продольная протиранию аномалии северная кривая ρ_k имеет длинную нисходящую ветвь, отбивающую на глубине 8 км проводник с продольной проводимостью S более 4000 См, восточная же кривая ρ_k не чувствует этот проводник. Это — поперечная "прозрачность" аномалии, наблюдаемая тогда, когда ширина аномалии или слагающих ее проводящих полос меньше их глубины.

Гипотеза дальнейшего продолжения Ильменской аномалии на юг иллюстрируется на левой верхней врезке рис. 12. Здесь находится Валдайский грабен (заштрихованная полоса) с продольной проводимостью более 2000 См, над осью которого векторы индукции меняют направление. При приближении к меридиану 32° в. д. чувст-

уется сложное наложение двух (или более) аномалий. Гипотетические варианты продолжения аномалии и ее соединения с Московско-Тамбовской аномалией показаны пунктиром со знаками вопроса. Такое соединение не противоречит поведению действительного вектора в п. ИЗМИР (обсерватория ИЗМИРАН, г. Троицк Московской обл.) и других пунктах, в частности показанных в верхней части нижней левой врезки рис. 12 (заимствованной из работы [Куликов и др., 2018], рис. 3). Еще более убедительно это видно на рис. 2 работы [Варенцов и др., 2012], где в прямоугольнике ($35\text{--}36^\circ$ в. д. \times $54,5\text{--}55^\circ$ с. ш.) приведено более 10 векторов индукции Си для периода 300 с величиной от 0,5 до 0,7, направленных почти на юг и выявляющих наличие севернее 55° с. ш. интенсивного аномального тока широтного простирания. Этот ток, по-видимому, обусловлен Осницко-Микашевичи—Московским вулканическим поясом (ОММВП) и/или увеличением мощности/проводимости осадочного чехла от южного борта Московской синеклизы к ее центру. Совокупность векторов индукции и магнитный тензор в самой северной части Бяратинской аномалии показывают наличие сравнительно небольшого аномального тока в северо-северо-западном направлении к возможному южному продолжению Ильменьской аномалии. Горизонтальный тензор М подтверждает такую возможность и выявляет вместе с векторами индукции слегка извилистую трассу Бяратинской аномалии от 55 до $52,8^\circ$ с. ш. Далее к югу она раздваивается на две значительно более интенсивные аномалии: Курскую, уходящую на юго-восток, и после сдвига на 1° долготы к западу — северное продолжение Кировоградской аномалии, продолжающееся на юг под осадочный чехол Днепрово-Донецкого Прогиба (ДДП) и переходящее далее в известную КАЭ, тянущуюся до Черного моря.

Общая дискуссия. Сопоставление с аномалиями потенциальных полей. Полученная выше Трансьевропейская цепь аномалий (ТЕЦАЭ) нанесена приближенно на

трехсегментную карту ВЕК (см. рис. 1) и карту аномалий постоянного магнитного поля (см. рис. 12). Карты построены в существенно разных проекциях, поэтому нельзя ожидать полного подобия форм аномалий. В местах, обеспеченных хорошими наблюдениями, они даны сплошной непрерывной линией (на рис. 12 — линией с зазубринами). Там, где аномалии проведены предположительно, использовались прерывистые линии, а в наиболее неопределенных случаях — ряд знаков вопроса.

Анализ пространственного положения аномалий электропроводности относительно аномалий постоянного геомагнитного поля показывает, что КАЭ и несколько менее четко ЛАЭ + И располагаются в зоне перехода от положительных аномалий постоянного поля на востоке к отрицательным аномалиям на западе. Аномалии электропроводности следуют транскратонному линеamentу аномального магнитного поля, выделяемому рядом исследователей в субмеридиональной полосе $\sim 30\text{--}34^\circ$ в. д. и прослеживаемому (с некоторой потерей корреляции под осью ОММВП) от Балтийского щита до Черного моря [Глубинное ..., 2004; Орлюк, Пашкевич, 2012]. Феномен ассоциации магнитных аномалий с аномалиями электропроводности связан с тектономагматическими процессами докембрийского прошлого и определяется структурно-вещественными комплексами, сформированными в их результате. Можно предположить сопряжение северного звена аномалий электропроводности с южным по линии градиента магнитных линеamentов и под областью ОММВП, как это происходит под Днепрово-Донецким прогибом с КАЭ и БАР. Это предположение выглядит в определенной мере оправданным в рамках гипотезы [Александрова и др., 2011; Соколова ..., 2017; Минц, Соколова, 2018] о связи проводников "А" ЛАЭ и БАР с графитизированными комплексами выделяемых Витебско-Торопецкого и Брянского гранулитовых поясов [Mints et al., 2014, 2015].

Естественная в случае "гранулитовой" гипотезы корреляция аномалий электро-

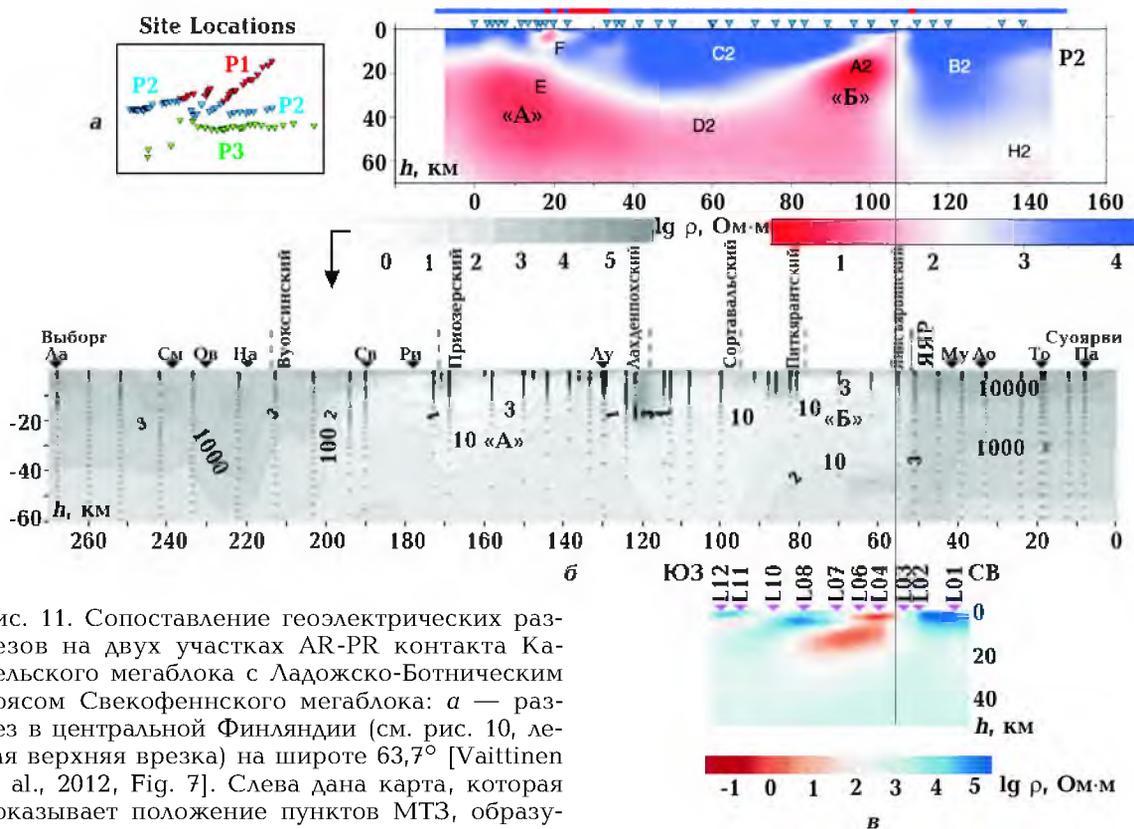


Рис. 11. Сопоставление геоэлектрических разрезов на двух участках AR-PR контакта Карельского мегаблока с Ладожско-Ботническим поясом Свекофеннского мегаблока: *a* — разрез в центральной Финляндии (см. рис. 10, левая верхняя врезка) на широте 63,7° [Vahtinen et al., 2012, Fig. 7]. Слева дана карта, которая показывает положение пунктов МТЗ, образующих три профиля (красные, синие и зеленые перевернутые треугольники). Красный цвет на тонкой полоске над профилем P2 показывает положение приповерхностных проводников по данным аэроэлектромагнитной съемки; *б* — разрез по профилю Выборг—Суоярви от 61 до 62° с. ш. по данным МТЗ 1990-х годов с указанием основных разломов и отдельных пунк-

тов МТ—АМТ наблюдений [Ковтун и др., 1998]; *в* — разрез зоны контакта AR-PR по результатам 3D инверсии ансамбля профильных МТ—МВ данных по линии ВС-2 [Таран и др., 2017] (вертикальный и горизонтальный масштабы различны).

проводности с положительным аномальным гравитационным полем в трансрегиональном плане несколько менее выражена, чем с магнитным, но она существует (см. рис. 12, правая нижняя врезка) и обсуждалась для Ладожской аномалии и Кировоградско-Барятинской в работах [Минц, Соколова, 2018; Алексанова и др., 2011; 2013], а также для аномалий УЩ [Гордиенко и др., 2005]. Этот вопрос требует специального анализа с рассмотрением различных трансформаций гравитационного поля. То же следует отнести и к гипотезе о связи проводников под ОММВП, доказательство которой в рамках существующих эволюционных представлений [Хаин, 2001; Mints et al., 2015 и др.] в настоящее вре-

мя представляется затруднительным, однако может быть достигнуто при получении новых, более представительных экспериментальных данных, в том числе палеомагнитных и геохронологических.

Геодинамические предположения. Остановимся на исследованиях относительного движения различных сегментов ВЕК, в первую очередь Сарматии и Фенноскандии, и попытаемся найти пути их сопряжения с гипотезой ТЕЦАЭ. Полученные в последние десятилетия палеомагнитные и тектонофизические данные свидетельствуют о том, что ориентация и взаимное расположение трех сегментов ВЕК изменялись во времени. Например, в работе [Очерки ..., 2018, с. 356] обсуждаются произошедший 1,8—1,75 млрд лет назад по-

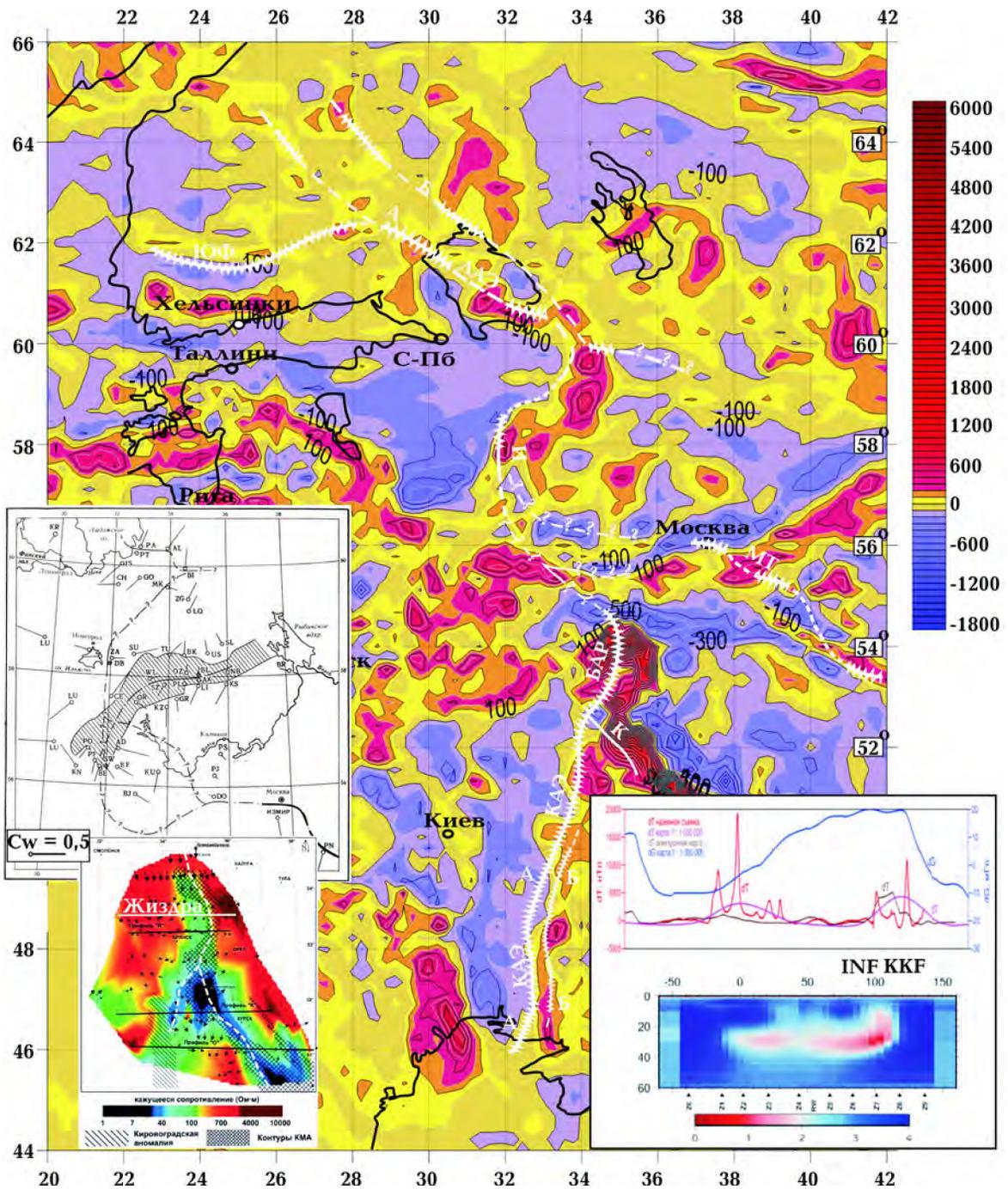


Рис. 12. Трансевропейская цепь аномалий электропроводности (ТЕЦАЭ) (дана белым цветом): Кировоградская (КАЭ, проводники А и Б), Барятинская (БАР с ответвлением К — Курская аномалия), Ладожско-Ильменская (ЛАЭ + И), Московско-Тамбовская (МТ) и Южно-Финляндская (ЮФ) представлены на фоне карты аномалий постоянного магнитного поля *На врезке слева* даны карты векторов индукции (верхняя из работы [Рокитянский и др., 1982, рис. 1] представляет векторы Визе, полученные по вариациям с периодом от 10 до 60 ми., заштрихованная полоса — Валдайский грабен; нижняя левая врезка из работы [Куликов и др., 2018, рис. 3], на ней даны действительные векторы для периода 300 с на фоне изолиний эффективного кажущегося сопротивления на периоде 300 с). Белый пунктир показывает ось Барятинской аномалии, которая южнее 53° с. ш. раздваивается на две ветви: западная соединяется с КАЭ, а восточная, названная Курской (К) аномалией, уходит на юг—юго-восток. Белый отрезок показывает профиль “Жиздра”. *Врезка справа* из работы [Алексанова и др., 2011, рис. 3];

ворот Сарматии на 54° против часовой стрелки, а также поворот ВЕК почти на 90° по часовой стрелке за последние 0,5 млрд лет. Кроме этих, установленных с опорой на имеющиеся экспериментальные данные движений, возможны и другие еще недокументированные. Полученные карты аномалий электропроводности могут быть использованы для оценки тектонических смещений как внутри доменов ВЕК, так и их перемещений друг относительно друга (например, Фенноскандии относительно Сарматии). Конкретный пример: переход от ЛАЭ к Ильменской аномалии — это перемещение на 2° долготы на запад. Переход от Бяратинской аномалии к южному продолжению Ильменской аномалии — также перемещение на 2° на запад. Так, возможно, в центральной части Вольно-Среднерусского межсегментового пояса и произошла такая подвижка. Если произвести обратное перемещение, то Трансъевропейская аномалия электропроводности выпрямится, а положительные аномалии постоянного магнитного поля образуют более четкий линеамент.

Выводы. Перечислим общие черты и различия КАЭ и ЛАЭ, выявленные в результате сопоставления их геоэлектрических параметров и локализации в каждой из них областей максимальной концентрации теллурических токов относительно зон сочленения AR и PR доменов.

1. Наличие в протерозойских геоблоках обеих аномальных зон на расстоянии 50—100 км от "AR-PR контакта" интенсивной глубинной аномалии электропроводности "А" с максимумом (T_0) частотной характеристики аномального поля МВП на периоде $T_0 \approx 1 \div 2$ тыс. с, что дает оценку суммарной продольной проводимости КАЭ и ЛАЭ $G \approx (1 \div 3) \cdot 10^8$ См · м. Однако глубина верхней кромки Кировоградской

аномалии составляет 15 ± 5 км по данным более 10 пунктов МТЗ над осью аномалии. Этот факт в совокупности с другими геофизическими данными позволяет допускать возможность флюидной природы КАЭ и предполагать процесс современной тектонической активизации в качестве ее источника. Глубина верхней кромки ЛАЭ на профиле Выборг—Суоярви варьирует от первых километров до сотен метров, включая выходы на поверхность электронно-проводящих пород [Соколова и др., 2017; Жамалетдинов и др., 2018]. Подобный результат получен и в центральной Финляндии [Vaithinen et al., 2012]. Причем в обоих случаях проводник простирается до глубины не менее 20 км. Предполагать на таких глубинах существование достаточно мощного (для обеспечения наблюдаемых значений S) реологически ослабленного флюидонасыщенного "слоя" затруднительно, особенно в условиях довольно низкого теплового потока [Artemieva, Shulgin, 2015]. Предпочтительной является гипотеза об электронной природе ЛАЭ, которая уже имеет геотектоническое обоснование [Миц, Соколова, 2018].

2. Наличие второй аномалии "Б", квазипараллельной описанной аномалии "А", непосредственно в разломной зоне AR-PR контакта и около него. Это Янисъярвинский разлом (ЯЯР) на БЩ и Криворожско-Кременчугский разлом (ККР) на УЩ. T_0 аномалии близ ЯЯР равно 100—150 с, через ККР сделано несколько профилей и величина T_0 получена со значительным разбросом, но в среднем такого же порядка. Аномалия "Б" получилась близкой по величине продольной проводимости аномалии "А" (10^4 См по данным МТЗ) в центральной Финляндии и порядка $(5-7) \cdot 10^3$ См в Северном Приладожье. Полагая графито/сульфидную природу аномалий от вы-

разрез удельных электрических сопротивлений (масштаб $\lg \rho$, Ом · м внизу) по результатам восьмикомпонентной 2D инверсии МТ/МВ данных по программе [Varentsov, 2007] на профиле ЖИЗДРА ($53,8^\circ$ с. ш.) и графики аномалий магнитного dT (нТл) (с карты 1 : 1 000 000 оранжевая кривая, с электронной карты — коричневая, по детальной наземной съемке — светло-коричневая) и гравитационного dG (мГал) полей.

ходов на поверхность до их глубинных частей, полученные геоэлектрические образы аномальных участков разреза можно трактовать как образы "структурного каркаса" земной коры — материал для построения минерагенических и геодинамических моделей докембрия, особенно ценный в областях отсутствия современных сейсмических данных и уже используемый, например, в работе [Минц, Соколова, 2018].

3. В архейских провинциях БЩ, в зонах вблизи контакта AR-PR, на всех разрезах в верхней коре до глубин 10—20 км получены удельные электрические сопротивления (УЭС), превышающие 10^4 Ом·м, а на больших глубинах в средней и нижней коре УЭС уменьшается до значений порядка 10^3 Ом·м. На Среднеприднепровском архейском мегаблоке УЩ получены более высокие УЭС, что, возможно, связано с искажающей геоэлектрической обстановкой: высокопроводящие осадочные бассейны с обеих сторон УЩ, приводящие к воздыманию кривых МТЗ (S-эффект) и сильные помехи.

4. Северным продолжением КАЭ на Воронежском массиве до $54,5^\circ$ с. ш. является Бяратинская аномалия электропроводности с глубиной верхней кромки порядка 15 км. Южным продолжением ЛАЭ (или ее ответвления), по-видимому, является Ильменская аномалия на 58° с. ш. с верхней кромкой около 8 км, продолжающаяся на юг до широты $57—56^\circ$ с. ш., где она поворачивает на восток, чтобы соединиться с Московско-Тамбовской аномалией; при этом есть некоторые указания на то, что ее часть ответвляется на юг на соединение с Бяратинской аномалией. Изложенное позволяет предположить наличие трансевропейской квазимеридиональной (от северного конца Ботничес-

кого залива до Черного моря) цепи аномалий электропроводности (ТЕЦАЭ).

5. Несколько участков ТЕЦАЭ находятся в градиентных зонах аномалий постоянного магнитного поля (АПМП) с положительными АПМП восточнее аномалий электропроводности и отрицательными — западнее их.

Ассоциация рассмотренных аномалий электропроводности Сарматии и Фенноскандии, составляющих ТЕЦАЭ, с трансрегиональным магнитным линеаментом и, как правило, в той или иной мере повышенным гравитационным полем обусловлена докембрийскими геотектоническими процессами в шовных зонах обоих доменов, определившими размещение в них сходных аномалиеобразующих структурно-вещественных комплексов.

Для подтверждения высказываемого предположения о сопряжении северной половины ТЕЦАЭ с южной под областью ОММВП по линии градиента магнитных линеаментов требуется продолжение как геоэлектрических, так и геологических исследований.

Благодарности. Авторы считают приятным долгом выразить свою благодарность рецензенту, д-ру геол. наук И. М. Логвинову, полезные замечания которого помогли существенно улучшить статью.

Особая благодарность всем коллегам-геофизикам, принимавшим участие в полевых геоэлектрических исследованиях на территориях обоих щитов, а также сотрудникам геомагнитных обсерваторий, данные которых использовались как удаленные базы для проведения обработки и анализа материалов рядовых МТ и МВ зондирований.

Исследования российских авторов поддержаны грантом РФФИ 16-05-00593 и ООО "Северо-Запад".

Список литературы

- Азаров Н.Я., Анциферов А.В., Шеремет Е.М., Глевасский Е.Б., Есипчук К.Е., Кулик С.Н., Бурахович Т.К., Пигулевский П.И., Николаев Ю.И., Николаев И.Ю., Сетая Л.Д., Захаров В.В., Курлов Н.К. Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита. Киев: Наук. думка, 2006. 196 с.
- Акрамовский И.И., Богданов Л.А., Богданов Ю.Б., Нахабцев С.А., Петров Б.В. Схема глубинного строения земной коры. 1 : 2 500 000. Геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Карта дочетвертичных образований. Р-(35)-37. Петрозаводск, 1998.
- Алексанова Е.Д., Баглаенко Н.В., Варенцов И.М., Куликов В.А., Логвинов И.М., Лозовский И.Н., Пушкарев П.Ю., Соколова Е.Ю., Соколов Н.С., Тарасов В.Н., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В. Сопоставление геофизических полей в зоне Кировоградской и Курской аномалий электропроводности: *Современное состояние наук о Земле (Материалы Международной конференции, посвященной памяти Виктора Ефимовича Хаина, г. Москва, 1—4 февраля 2011 г.)*. Москва: Изд. Геол. факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, С. 33—37.
- Алексанова 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—37.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир, 2009. 680 с.
- Быстревская С.С., Гавриш В.К., Недошовенко А.И. и др. Космотектоническая карта Украины и ее прогнозные значения. *Геол. журн.* 1985. Т. 45. № 6. С. 18—24.
- 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. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 90—107.
- Глубинное строение и сейсмичность Карело-Кольского региона и его обрамления. Ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2004. 365 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: Изд. Ин-та геофизики НАН Украины, 2005. 210 с.
- Грачев А.Ф. Рифтовые зоны Земли. Москва: Недра, 1987. 285 с.
- Дьяконова А.Г., Ингеров А.И., Рокитянский И.И. Электромагнитные зондирования на Восточно-Европейской платформе и Урале. Киев: Наук. думка, 1986. 140 с.
- Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 22—39.
- Жамалетдинов А.А., Колесников В.Е., Скороходов А.А., Шевцов А.Н., Нилов М.Ю., Рязанцев П.А., Шаров Н.В., Бируля М.А., Киряков И.А. Результаты электропрофилирования на постоянном токе в комплексе с АМТЗ по профилю, пересекающему Ладожскую аномалию. *Труды КарНЦ РАН. Сер. Геология Докембрия*. 2018. № 2. С. 91—110. doi: 10.17076/geo636.
- Ингеров А.И., Бугримов Л.П., Пелюшенко В.М., Бойко А.З., Рокитянский И.И., Лысенко Е.С., Ромашкина А.И., Ганоцкий О.В., Томчаков Л.И. Результаты региональных исследований МТЗ вдоль геотраверсов Ужгород—Ворошиловград и Арташат—Ахалцихе с целью изучения глубинного строения земной коры. Отчет за 1987—1990 г. по титулу 248/87. Днепропетровск: Укргеология, Фонды ЦГЭ, 1990.
- Ингеров А.И., Бугримов Л.П., Рокитянский И.И., Ромашкина А.И. Отчет об исследованиях МТЗ по изучению геоэлектрического разреза земной коры по геотраверсу VIII Килия—Кривой Рог—Харьков за 1984—1985 гг.

- по титулу 248/84. Днепропетровск: Министерство геологии УССР, Фонды ЦГЭ, 1986.
- Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданыц И.Л. и др. Строение коры и мантии по профилю Суоярви—Выборг по магнитотеллурическим данным. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 4. Физика. Химия*. 1998. Вып. 4. С. 25—34.
- Ковтун А.А., Варданыц И.Л., Легенькова Н.П., Смирнов М.Ю., Успенский Н.И. Особенности строения Карельского региона по данным геоэлектрических исследований. *Глубинное строение и сейсмичность Карело-Кольского региона и его обрамления*. Ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2004. С. 102—130.
- Ковтун А.А., Варданыц И.Л., Успенский Н.И. Сопоставление сейсмической и геоэлектрической моделей Ладожско-Ботнической аномальной зоны. *Вопросы геофизики*. 2011. Вып. 44. С. 124—133.
- Куликов В.С., Светов С.А., Слабунов А.И., Куликова В.В., Полин А.К., Голубев А.И., Горьковец В.Я., Иващенко В.И., Гоголев М.А. Геологическая карта Юго-Восточной Фенноскандии (масштаб 1 : 750 000): новый подход к составлению карты. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2016. № 2. С. 3—41. doi: 10.17076/geo444.
- Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М., Зайцев С.А., Лозовский И.Н., Лубнина Н.В., Пушкарев П.Ю., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г., Ионичева А.П. Барятинская коровая аномалия электропроводности по результатам площадных МТ-исследований. *Геофизика*. 2018. № 1. С. 31—43.
- Логвинов И.М. Геоэлектрические характеристики земной коры и мантии юго-запада Восточно-Европейской платформы и Карпат: Дис. ... д-ра геол. наук. Киев, 2012, 306 с.
- Логвинов И.М., Тарасов В.Н. Геоэлектрическая 2D модель Кировоградской аномалии электропроводности. *Геофиз. журн*. 2005. Т. 27. № 5. С. 754—769.
- Миц М.В., Соколова Е.Ю., Рабочая группа LADOGA. Объемная модель глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена по данным МОВ—ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования. *Труды КарНЦ РАН. Сер. Геология Докембрия*. 2018. № 2. С. 34—61. doi: 10.17076/geo656.
- Орлюк М.И., Пашкевич И.К. Глубинные источники региональных магнитных аномалий и связь с трансоровыми разломами. *Геофиз. журн*. 2012. Т. 34. № 4. С. 224—234. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116776>.
- Очерки геодинамики Украины. Под ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтова. Киев: Изд. Ин-та геофизики НАН Украины, 2018. 466 с.
- Пигулевский П.И. Строение и минерогения земной коры и верхней мантии восточной части Украинского щита по результатам комплексных геолого-геофизических исследований: Дис. ... д-ра геол. наук. Киев, 2012. 382 с.
- Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 280 с.
- Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Логвинов И.М., Рокитянская Д.А. Аномалии геомагнитных вариаций на северо-западе Европейской части СССР. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1982. № 11. С. 101—106.
- Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Рокитянская Д.А. Ладожская аномалия электропроводности. *Геофиз. журн*. 1981. Т. 3. № 3. С. 97—99.
- Рокитянский И.И., Логвинов И.М., Лугинина Н.А. Магнитовариационное профилирование на Украинском щите. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1969. № 3. С. 100—111.
- Рокитянский И.И., Терешин А.В., Трегубенко В.И., Голубцова Н.С., Ингерев А.И., Савченко Т.С. Обзор наблюдений МВП—МТЗ в южной части Кировоградской аномалии электропроводности и первый опыт плечного моделирования структуры Украинского щита. *Геофиз. журн*. 2012. Т. 34. № 3. С. 92—101. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i3.2012.116644>.
- Соколова Е.Ю., Голубцова Н.С., Ковтун А.А., Куликов В.А., Лозовский И.Н., Пушкарев П.Ю., Рокитянский И.И., Таран Я.В., Яковлев А.Г.

- Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности. *Геофизика*. 2016. № 1. С. 48—61.
- Соколова Е.Ю. и рабочая группа ЛАДОГА. Эксперимент синхронного МТ/МВ зондирования Ладожской аномалии электропроводности: новые свидетельства о структуре коры юго-востока Балтийского щита. *Глубинное строение и геодинамика Приладожья: Материалы Всероссийской конференции с международным участием*. Петрозаводск: Изд. Института геологии Карельского научного центра РАН, 2017. С. 205—214.
- Таран Я.В., Зайцев С.В., Соколова Е.Ю., Пушкарев П.Ю. Опыт инверсии данных новых МТ\МВ зондирований по профилю Выборг—Суоярви через Ладожскую аномалию электропроводности. *Глубинное строение и геодинамика Приладожья: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Институт геологии Карельского научного центра РАН*. Петрозаводск, 2017. С. 224—230.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). Москва. Научный мир, 2001. 604 с.
- Шаров Н.В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2017. 173 с.
- Artemieva, I.M., & Shulgin, A. (2015). Is the Proterozoic Ladoga Rift (SE Baltic Shield) a rift? *Precambrian Research*, 259, 34—42. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.08.011>.
- Bogdanova, S.V., Pashkevich, I.K., Gorbachev, R., & Orlyuk, M.I. (1996). Riphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics. *Tectonophysics*, 268 (1-4), 1—21. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00232-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00232-6).
- Fujiwara, S., & Toh, H. (1996). Geomagnetic transfer functions in Japan obtained by first order geomagnetic Survey. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 48 (8), 1071—1101. <https://doi.org/10.5636/jgg.48.1071>.
- Hjelt, S.E., Korja, T., Kozlovskaya, E., Lahti, I., Yliniemi, J. & BEAR and SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group. (2006). Electrical conductivity and seismic velocity structures of the lithosphere beneath the Fennoscandian Shield. *Geol. Soc., London, Memoirs*, 32, 541—559. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.33>.
- Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., & Tregubenko, V.I. (1999). Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth, Planets and Space*, 51 (10), 1127—1133. <https://doi.org/10.1186/BF03351586>.
- Kukkonen, I.T. (2011). *Outokumpu Deep Drilling Project 2003—2019*. Geological Survey of Finland, Espoo. Special Paper 51.
- Korja, T., Engels, M., Zhamaletdinov, A.A., Kovtun, A.A., Palshin, N.A., Smirnov, M.Yu., ... the BEAR Working Group. (2002). Crustal conductivity in Fennoscandia — a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield. *Earth, Planets and Space*, 54 (5), 535—558. <https://doi.org/10.1186/BF03353044>.
- Marchenko A., & Orliuk M. (2010). 3D magnetic model of the East European Craton and its effect at near-surface and satellite heights. *Геофиз. журн.*, 32 (4), 96—98.
- Mints, M.V., Dokukina, K.A., Konilov, A.N., Philippova, I.B., Zlobin, V.L., Babayants, P.S., ... Zamozhniaya, N.G. (2015). *East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure* (Vol. 510). Geological Society of America Special Paper. <http://dx.doi.org/10.1130/2015.2510>.
- Mints, M.V., Bush, W.A., & Ageev, S.N. (2014). Bryansk—Kursk—Voronezh intra-continental collisional orogen (East European craton). *Geodynamics and Tectonophysics*, 5(3), 717—742. doi: 10.5800/GT-2014-5-3-0151.
- Pajunpää, K. (1987). Conductivity anomalies in the Baltic Shield in Finland. *Geophysical Journal International*, 91 (3), 657—666. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1987.tb01663.x>.
- Pajunpää, K., Heikka, J., & Korja, T. (1983). Magnetometer array studies in Finland. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 35 (11-12), 543—553. <https://doi.org/10.5636/jgg.35.543>.

- Schmucker, U. (1970). Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. *Bull. Scripps. Inst. Oceanogr*, 13, 165.
- Vaittinen, K., Korja, T., Kaikkonen, P., Lahti, I., & Smirnov, M. Yu. (2012). High-resolution magnetotelluric studies of the Archean-Proterozoic border zone in the Fennoscandian Shield, Finland. *Geophysical Journal International*, 188 (3), 908—924. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05300.x>.
- Varentsov, Iv. M. (2007). Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. In V. V. Spichak (Ed.), *EM sounding of the Earth's interior. Methods in geochemistry and geophysics* (Vol. 40, pp. 259—273). Amsterdam: Elsevier.

Electrical conductivity anomalies in the joint zones of Archean and Proterozoic geoblocks on the Ukrainian and Baltic Shields

I. I. Rokityansky, E. Yu. Sokolova, A. V. Tereshyn, A. G. Yakovlev & LADOGA Working group

Kirovograd (KA) and Ladoga (LA) anomalies of the crustal electrical conductivity are located in the Sarmatian and Fennoscandinavian domains of the East European Craton. In the paper the main attention is paid to the areas of anomalies, which are juxtaposed with the regional linear zones of Archean (AR) and Proterozoic (PR) geoblocks junction. For Fennoscandia, the analysis is based on data from the latest magnetotelluric (MTS) and magnetovariational (MVP) studies with emphasis on the anomalous fields of horizontal components of geomagnetic variations (tensor M). Comparison of the geoelectric parameters of the KA and LA reveals the prominent features of their similarities and differences. Both anomalies consist of two quasi-parallel conductors "A" and "B", distant one from another on 50—100 km. The main conductors "A" are located within megablocks of the PR age. They were detected by the anomalous behavior of geomagnetic variations (MVP method) and have a maximum frequency response of the MVP parameters (induction vectors and tensor M) at the periods $T_0 \approx 1 \div 2$ thousand seconds, which gives the estimates of the total longitudinal conductance $G \approx (1—3) \cdot 10^8 \text{ S} \cdot \text{m}$ for both KA and LA anomalies. Subparallel conductors "B" produce extremal responses at higher frequencies ($T_0 \approx 100 \div 300 \text{ s}$) and are less conductive ($G \approx (0,4—2) \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}$). Conductor "B" directly marks the AR-PR border, which passes through regional faults: the Yanisyarvinsky on the Baltic Shield and the Krivorozhsko-Kremenchugsky on the Ukrainian Shield. Recent studies reveal the existence of Baryatinska anomaly of electrical conductivity on the western slope of the Voronezh massif which can be considered as the northern continuation of the KA-anomaly up to $54,5^\circ$ of northern latitude. The southern extension of the LA is the Ilmenska anomaly at the 58° of northern latitude, apparently running to 56° and having a branch, probably, extending up to the Baryatinska anomaly. These data give rise the hypotheses of the Trans-European sub-meridional chain of electrical conductivity anomalies (TECAE), stretching from the northern end of the Gulf of Bothnia to the Black Sea. We present geophysical materials supporting this assumption, with the most solid one being the general spatial coincidence of the TECAE with the gradient zones of the transcraton permanent magnetic field anomalies (PMFA), where the positive PMFA are located east of the electrical conductivity anomalies, and the negative ones are west of them.

Key words: magnetovariational sounding, horizontal magnetic tensor, induction vectors, electrical conductivity anomalies, Precambrian Shields, Archean and Proterozoic geoblocks, transregional lineaments and geophysical anomalies.

References

- Azarov, N.Ya., Antsyferov, A.V., Sheremet, E.M., Hlevasskiy, E.B., Esypchuk, K.E., Kulyk, S.N., ... Kurlov, N.K. (2006). Geological and geophysical model of the Krivoy Rog-Kremenchuk suture zone of the Ukrainian Shield. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Akramovsky, I.I., Bogdanov, L.A., Bogdanov, Yu.B., Nahabtsev, S.A., & Petrov, B.V. (1998). Scheme of the deep structure of the Earth's crust. 1 : 2 500 000. Geological map of the Russian Federation scale 1 : 1 000 000. Map of Quaternary Formations. P-(35)-37. Petrozavodsk (in Russian).
- Aleksanova, E.D., Baglaenko, N.V., Varentsov, Iv.M., Kulikov, V.A., Logvinov, I.M., Lozovsky, I.N., ... Yakovlev, D.V. (2011). Comparison of geophysical fields in the Kirovograd and Kursk conductivity anomalies zones: *The current state of Earth sciences (Proceedings of the International conference dedicated to the memory of Viktor Khain, Moscow, February 1—4, 2011)* (pp. 33—37). Moscow: Faculty of Geology Moscow State University (in Russian).
- Aleksanova, E.D., Varentsov, Iv.M., Kulikov, V.A., Logvinov, I.M., Lozovskiy, I.N., Pushkarev, P.Iu., ... Yakovlev, A.H. (2013). Deep electrical conductivity anomalies in the northern part of the Voronezh anticline. *Geofizika*, (2), 32—37 (in Russian).
- Berdichevskiy, M.N., & Dmitriev, V.I. (2009). Models and methods of magnetotellurics. Moscow: Nauchnyy Mir (in Russian).
- Bystrevskaya, S.S., Gavrish, V.K. Nedoshovenko, A.I. et al. (1985). Cosmotektonic map of Ukraine and its predictive value. *Geologicheskii zhurnal*, 45(6), 18—24 (in Russian).
- Varentsov, Iv.M., Kovachikova, S., Kulikov, V.A., Logvinov, I.M., Tregubenko, V.I., & Yakovlev, A.G. (2012). Working group KIROVOGRAD. Synchronous magnetotelluric and magnetovariational soundings on the western slope of the Voronezh massif. *Geofizicheskii zhurnal*, 34(4), 90—107 (in Russian).
- Sharov, N.V. (Ed.). (2004). *Deep structure and seismicity of the Karelo-Kola region and its surroundings*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, Iv.V., Zavgorodnya, O.V., Kovachikova, S., Logvinov, I.M., Tarasov, V.N., & Usenko, O.V. (2005). *Ukrainian Shield (geophysics, deep processes)*. Kiev: Publ. of the Institute of Geophysics, NAS of Ukraine (in Russian).
- Grachev, A.F. (1987). *Rift zones of the Earth*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Dyakonova, A.G., Ingierov, A.I., & Rokityansky, I.I. (1986). *Electromagnetic soundings on the East European Platform and the Urals*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Zhamaletdinov, A.A., & Kulik, S.N. (2012). First-rate anomalies of electro-conductivity on the Globe. *Geofizicheskii zhurnal*, 34(4), 22—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116747>.
- Zhamaletdinov, A.A., Kolesnikov, V.E., Skorohodov, A.A., Shevtsov, A.N., Nilov, M.Yu., Ryazantsev, P.A., ..., Kiryakov, I.A. (2018). Results of the electroprofiling with direct current in complex with AMTS on the profile crossing the Ladoga anomaly. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ser. Precambrian geology*, (2), 91—110. doi: 10.17076/geo636 (in Russian).
- Ingerov, A.I., Bugrimov, L.P., Pelyushenko, V.M., Boyko, A.Z., Rokityansky, I.I., Lysenko, E.S., ... Tomchakov, L.I. (1990). *The regional studies MTS results along the Uzhgorod—Voroshilovgrad and Artashat—Akhaltzikhe geotravers with the aim of deep-seated structure study of the Earth's crust*. Report for 1987—1990 on the title 248/87. Dnipropetrovsk: Ukrgeology (in Russian).
- Ingerov, A.I., Bugrimov, L.P., Rokityansky, I.I., & Romashkina, A.I. (1986). Report on the MTS works for the Earth's crust geoelectric study along the geotravers VIII Kiliya—Kryvoi Rog—Kharkov in 1984—1985. Report under the title 248/84, Ukrgeology, Dnepropetrovsk, CGE (in Russian).

- Kovtun, A.A., Vagin, S.A., Vardanyants, I.L. (1998). Structure of the crust and mantle along the Suoyarvi—Vyborg profile by magnetotelluric data. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 4. Fizika. Khimiya*, (4), 25—34 (in Russian).
- Kovtun, A.A., Vardanyants, I.L., Legenkova, N.P., Smirnov, M.Yu., & Uspensky, N.I. (2004). Features of the Karelian region structure according to geoelectric researches. In N.V. Sharov (Ed.), *Deep structure and seismicity of the Karelian-Kola region and its surroundings* (pp. 102—130). Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (in Russian).
- Kovtun, A.A., Vardanyants, I.L., & Uspensky, N.I. (2011). Comparison of seismic and geoelectric models of the Ladoga-Bothnic anomalous zone. *Voprosy geofiziki*, (44), 124—133 (in Russian).
- Kulikov, V.S., Svetov, S.A., Slabunov, A.I., Kulikova, V.V., Pauline, A.K., Golubev, A.I., ... Gogol, M.A. (2016). Geological map of Southeast Fennoscandia (scale 1 : 750 000): a new approach to mapping. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN*, (2), 3—41. doi: 10.17076/geo444 (in Russian).
- Kulikov, V.A., Aleksanova, E.D., Varentzov, Iv. M., Zaitsev, S.A., Lozovsky, I.N., Lubnina, N.V., ... Ionicheva, A.P. (2018). Baryatin electric conductivity crustal anomaly by results of MT field studies. *Geofizika*, (1), 31—43 (in Russian).
- Logvinov, I.M. (2012). *Geoelectrical characteristics of the crust and mantle of the southwest part of the Eastern European Platform and the Carpathians*. Doctor's thesis. Kyiv: IGF NASU (in Russian).
- Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2005). Geoelectric 2D model of the Kirovograd electrical conductivity anomaly. *Geofizicheskiy zhurnal*, 27(5), 754—769 (in Russian).
- Mintz, M.V., Sokolova, E.Yu. & LADOGA Working group (2018). 3D model of the deep structure of the Svekofenian accretionary orogen based on the data of seismic reflection method, CDP, MTS and density modeling. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ser. Precambrian geology*, (2), 34—61. doi: 10.17076/geo656 (in Russian).
- Orlyuk, M.I., & Pashkevich, I.K. (2012). Deep sources of regional magnetic anomalies and the connection with transverse faults. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(4), 224—234. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116776> (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Gintov, O.B. (Eds.). (2018). *Essays on geodynamics of Ukraine*. Kiev: Publ. of the Institute of Geophysics, NAS of Ukraine (in Russian).
- Pigulevskiy, P.I. (2012). *The structure and mineralogy of the Earth's crust and upper mantle of the eastern part of the Ukrainian Shield by the complex geological and geophysical studies results*. Doctor's thesis. Kyiv: Kyiv National University (in Russian).
- Rokityansky, I.I. (1975). Investigation of the electrical conductivity anomalies by the magnetovariational profiling method. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Rokityansky, I.I., Kulik, S.N., Logvinov, I.M., & Rokityanskaya, D.A. (1982). Geomagnetic variations anomalies in the northwest of the European part of the USSR. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, (11), 101—106 (in Russian).
- Rokityansky, I.I., Kulik, S.N., & Rokityanskaya, D.A. (1981). Ladoga electrical conductivity anomaly. *Geofizicheskiy zhurnal*, 3(3), 97—99 (in Russian).
- Rokityansky, I.I., Logvinov, I.M., & Luginina, N.A. (1969). Magnetovariation profiling on the Ukrainian Shield. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, (3), 100—111 (in Russian).
- Rokityansky, I.I., Tereshyn, A.V., Tregubenko, V.I., Golubtsova, N.S., Ingerov, A.I., & Savchenko, T.S. (2012). Overview of the observations of the MVP—MTS in the southern part of the Kirovograd electrical conductivity anomaly and the first experience of film modeling of the structure of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(3), 92—101. <https://doi.org/>

- 10.24028/gzh.0203-3100.v34i3.2012. 116644 (in Russian).
- Sokolova, E.Yu., Golubtsova, N.S., Kovtun, A.A., Kulikov, V.A., Lozovsky, I.N., Pushkarev, ... Yakovlev, A.G. (2016). The results of synchronous magnetotelluric and magnetovariational sounding in the area of the Ladoga electrical conductivity anomaly. *Geofizika*, (1), 48—61 (in Russian).
- Sokolova E.Yu. & LADOGA Working group. (2017). Experiment of synchronous MT/MV sounding of Ladoga electrical conductivity anomaly: new evidence of the crust structure on the southeast part Baltic Shield. *Depth structure and geodynamics of the Ladoga area: Materials of the All-Russian conference with international participation* (pp. 205—214). Petrozavodsk: Publ. Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (in Russian).
- Taran, Y.V., Zaitsev, S.V., Sokolova, E.Yu., & Pushkarev, P.Yu. (2017). Investigation of the inversion of new MT/MV sounding data by Vyborg—Suoyarvy profile through the Ladoga electric conductivity anomaly. *Depth structure and geodynamics of the Ladoga area: Materials of the All-Russian conference with international participation* (pp. 224—230). Petrozavodsk: Publ. Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (in Russian).
- Khain, V.E. (2001). Tectonics of the continents and oceans (2000). Moscow: Nauchny Mir (in Russian).
- Sharov, N.V. (2017). Lithosphere of Northern Europe by seismic data. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (in Russian).
- Artemieva, I.M., & Shulgin, A. (2015). Is the Proterozoic Ladoga Rift (SE Baltic Shield) a rift? *Precambrian Research*, 259, 34—42. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.08.011>.
- Bogdanova, S.V., Pashkevich, I.K., Gorbachev, R., & Orlyuk, M.I. (1996). Riphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics. *Tectonophysics*, 268 (1-4), 1—21. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00232-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00232-6).
- Fujiwara, S., & Toh, H. (1996). Geomagnetic transfer functions in Japan obtained by first order geomagnetic Survey. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 48 (8), 1071—1101. <https://doi.org/10.5636/jgg.48.1071>.
- Hjelt, S.E., Korja, T., Kozlovskaya, E., Lahti, I., Yliniemi, J. & BEAR and SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group. (2006). Electrical conductivity and seismic velocity structures of the lithosphere beneath the Fennoscandian Shield. Geol. Soc., London, Memoirs, 32, 541—559. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.33>.
- Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., & Tregubenko, V.I. (1999). Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth, Planets and Space*, 51 (10), 1127—1133. <https://doi.org/10.1186/BF03351586>.
- Kukkonen, I.T. (2011). *Outokumpu Deep Drilling Project 2003—2019*. Geological Survey of Finland, Espoo. Special Paper 51.
- Korja, T., Engels, M., Zhamaletdinov, A.A., Kovtun, A.A., Palshin, N.A., Smirnov, M.Yu., ... the BEAR Working Group. (2002). Crustal conductivity in Fennoscandia — a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield. *Earth, Planets and Space*, 54 (5), 535—558. <https://doi.org/10.1186/BF03353044>.
- Marchenko A., & Orliuk M. (2010). 3D magnetic model of the East European Craton and its effect at near-surface and satellite heights. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32 (4), 96—98.
- Mints, M.V., Dokukina, K.A., Konilov, A.N., Philippova, I.B., Zlobin, V.L., Babayants, P.S., ... Zamozhniaya, N.G. (2015). *East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure* (Vol. 510). Geological Society of America Special Paper. <http://dx.doi.org/10.1130/2015.2510>.
- Mints, M.V., Bush, W.A., & Ageev, S.N. (2014). Bryansk—Kursk—Voronezh intra-continental collisional orogen (East European craton). *Geo-*

- dynamics and Tectonophysics*, 5(3), 717—742. doi: 10.5800/GT-2014-5-3-0151.
- Pajunpää, K. (1987). Conductivity anomalies in the Baltic Shield in Finland. *Geophysical Journal International*, 91(3), 657—666. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1987.tb01663.x>.
- Pajunpää, K., Heikka, J., & Korja, T. (1983). Magnetometer array studies in Finland. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 35(11-12), 543—553. <https://doi.org/10.5636/jgg.35.543>.
- Schmucker, U. (1970). Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. *Bull. Scripps. Inst. Oceanogr*, 13, 165.
- Vaittinen, K., Korja, T., Kaikkonen, P., Lahti, I., & Smirnov, M. Yu. (2012). High-resolution magnetotelluric studies of the Archaean-Proterozoic border zone in the Fennoscandian Shield, Finland. *Geophysical Journal International*, 188(3), 908—924. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05300.x>.
- Varentsov, Iv. M. (2007). Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. In V. V. Spichak (Ed.), *EM sounding of the Earth's interior. Methods in geochemistry and geophysics* (Vol. 40, pp. 259—273). Amsterdam: Elsevier.