

**История и современное состояние
магнитотеллурических исследований литосферы в России**

Пушкарев П.Ю.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Геофизический **метод магнитотеллурического (МТ) зондирования** основан на использовании низкочастотного электромагнитного (ЭМ) поля Земли для изучения её электропроводности на различных глубинах. Развитие этого метода началось в 1950-е годы с пионерских работ А.Н. Тихонова (СССР), Л. Каньяра (Франция) и Т. Рикитаки (Япония).

Андрей Николаевич Тихонов (рис. 1) начал заниматься теоретическими проблемами электроразведки во время Второй мировой войны, уже будучи известным математиком, членом-корреспондентом Академии наук СССР. В то тяжелое время стране нужна была нефть, и он принимал участие в электроразведочных исследованиях по поиску нефтяных месторождений в Башкирии. Тогда им была доказана теорема единственности решения обратной задачи метода постоянного тока и заложены основы теории решения обратных (некорректных) задач.

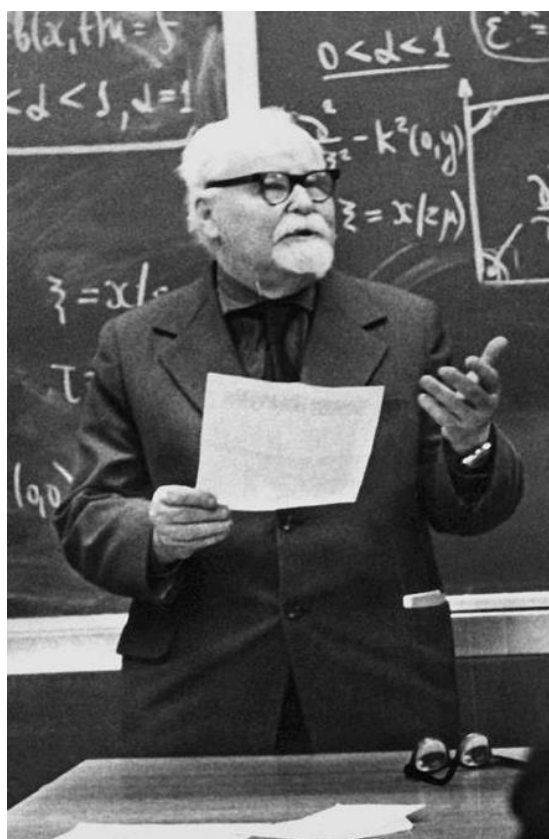


Рис. 1. Андрей Николаевич Тихонов (1906-1993).

В послевоенные годы наблюдалось бурное развитие геофизических методов, использующих переменные ЭМ поля. Ключевой работой в этом направлении была опубликованная в 1950-м году статья А.Н. Тихонова, в которой он предлагал использовать соотношение между ортогональными электрической и магнитной компонентами естественного низкочастотного поля. С тех пор метод МТ зондирования развивался как в СССР, так и по всему миру.

В институте «ВНИИГЕОФИЗИКА» в Москве разработкой и внедрением ЭМ методов занимались М.Н. Бердичевский и Л.Л. Ваньян. **Марк Наумович Бердичевский** (рис. 2) сыграл важнейшую роль в теоретическом обосновании метода МТ зондирований (в частности, он предложил использовать тензор импеданса $[Z]$, связывающий горизонтальные вектора электрического и магнитного полей), а также в его применении в Западной Сибири и в других нефтегазоперспективных регионах СССР. С 1969-го года М.Н. Бердичевский работал в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова (МГУ), где его научная деятельность была связана как с дальнейшим теоретическим развитием магнитотеллурики, так и с её применением для изучения аномалий электропроводности, выявленных в континентальной консолидированной земной коре многих регионов, и связанных, главным образом, с её флюидизацией и графитизацией.

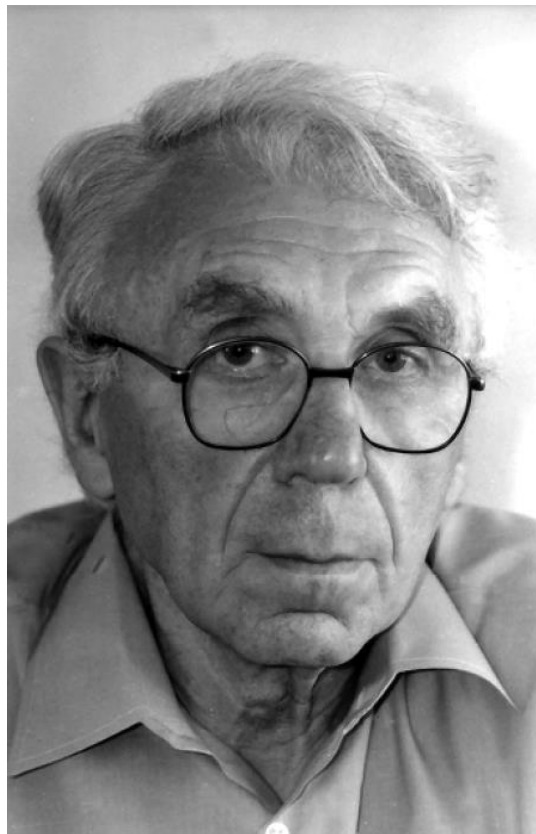


Рис. 3. Марк Наумович Бердичевский (1923-2009).

Леонид Львович Ваньян (рис. 3) вначале в основном занимался разработкой методов ЭМ зондирования, использующих управляемый источник в частотной или временной области. В дальнейшем в области его научных интересов было применение МТ метода для исследования неоднородного проводящего слоя в верхней мантии Земли (астеносферы), связанного с частичным плавлением вещества. В последние годы жизни Л.Л. Ваньян работал в Институте океанологии, занимаясь применением ЭМ методов с использованием искусственных и естественных полей для изучения земной коры и верхней мантии океанов.



Рис. 3. Леонид Львович Ваньян (1932-2001).

Важнейшую роль в развитии методов решения прямых и обратных задач ЭМ геофизики сыграли работы профессора МГУ **Владимира Ивановича Дмитриева** (рис. 4). Им были решены, с помощью метода интегральных уравнений, прямые 2D и 3D задачи магнитотеллурики, что позволило разработать теорию искажений кривых МТ зондирования в горизонтально-неоднородных средах, а впоследствии и решать 2D и 3D обратные задачи. Большое значение в последнем случае играет Тихоновская регуляризация, позволяющая получать решение достаточно детальное, и в то же время правдоподобное, согласующееся с априорной информацией.

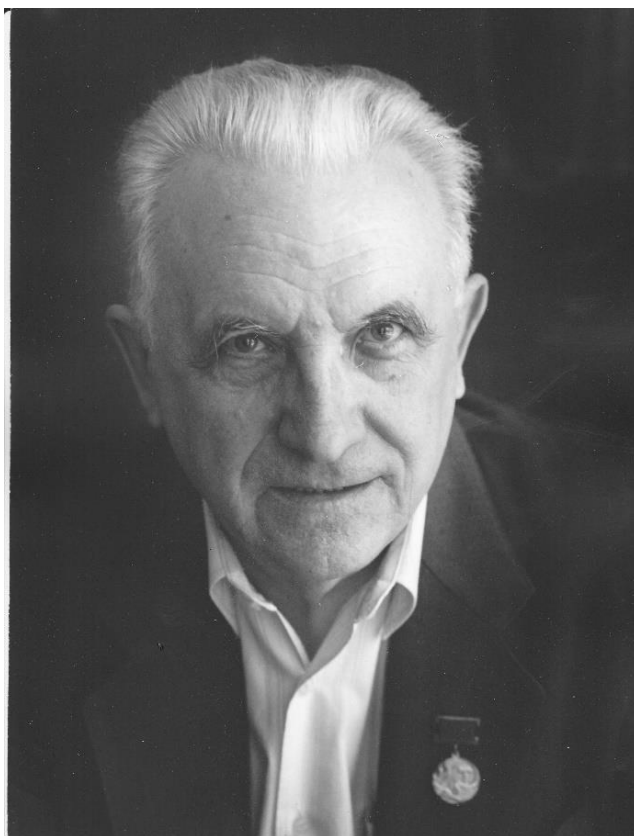


Рис. 4. Владимир Иванович Дмитриев.



Рис. 5. Аида Андреевна Ковтун (1929-2016).

В Санкт-Петербургском университете исследования естественного ЭМ поля и, с его помощью, геоэлектрического строения литосферы, долгие годы осуществлялись под руководством **Аиды Андреевны Ковтун** (рис. 5). Ей была получена, в обсерватории Борок, одна из первых кривых МТ зондирования. В дальнейшем с помощью магнитотеллурического метода был исследован целый ряд аномалий электропроводности в земной коре на Балтийском щите, метод был внедрен для решения многих геологических задач с разными глубинами исследования на северо-западе страны и в других регионах.

Ограниченный объём доклада не позволяет рассказать о многих других выдающихся геофизиках, занимавшихся в университетах, научных институтах и производственных организациях СССР развитием МТ метода и его применением для решения глубинных и поисково-разведочных задач. Регулярно проводились Всесоюзные школы-семинары по ЭМ зондированиям, на которых читались лекции ведущих специалистов и обсуждались новые результаты, полученные в регионах от Карпат до Камчатки и от Арктики до Тянь-Шаня.

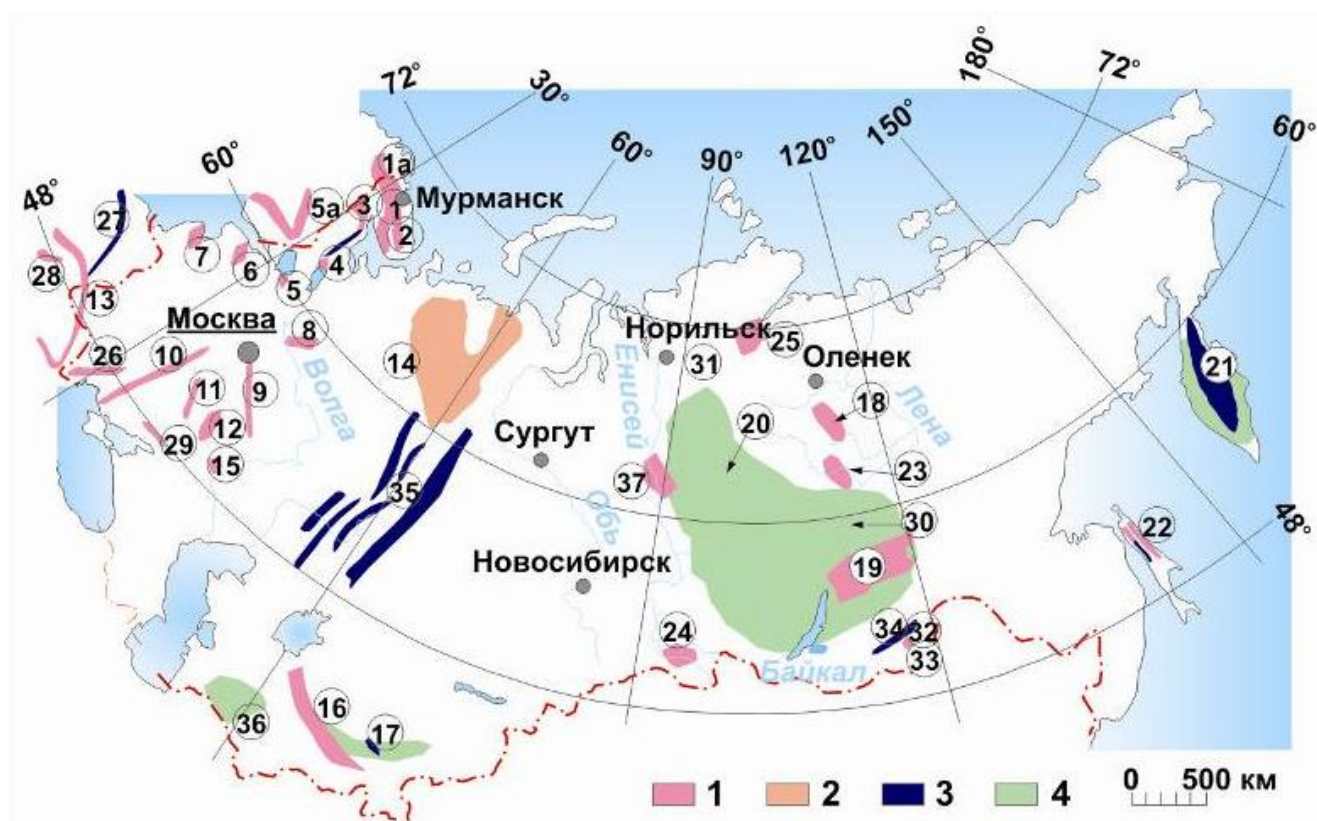


Рис. 6. Схема коровых аномалий электропроводности на территории бывшего СССР [Жамалетдинов, 1996]. Аномалии предположительно электропроводящей природы: 1 - линейные, 2 - площадные высокопроводящие зоны; аномалии предположительно флюидной природы: 3 - линейные, 4 - площадные проводящие зоны.

Возникла необходимость систематизировать полученные результаты по электропроводности земной коры. По инициативе ведущих ученых страны и по поручению Министерства геологии СССР была организована работа по составлению **карты корового проводящего слоя на территории СССР** по данным ЭМ исследований. Работу возглавлял Редакционный совет карты (председатель М.Н. Бердичевский, заместители - Л.Л. Ваньян и М.С. Жданов), в который вошли представители более 30 организаций.

К сожалению, после распада СССР в начале 1990-х годов эта работа была свернута из-за отсутствия финансирования, и её основные результаты оставались неопубликованными. Однако, вскоре А.А. Жамалетдиновым была составлена обобщающая накопленные данные схема аномалий коровой электропроводности (рис. 6). На ней отражён предположительный доминирующий механизм проводимости (электронопроводящий или ионопроводящий).

Бурное развитие вычислительной техники на рубеже веков привело к внедрению новых технологий измерений и методов обработки и интерпретации данных. В последнее десятилетие стали применяться региональные площадные исследования, сочетающие глубинные и разведочные магнитотеллурические зондирования.

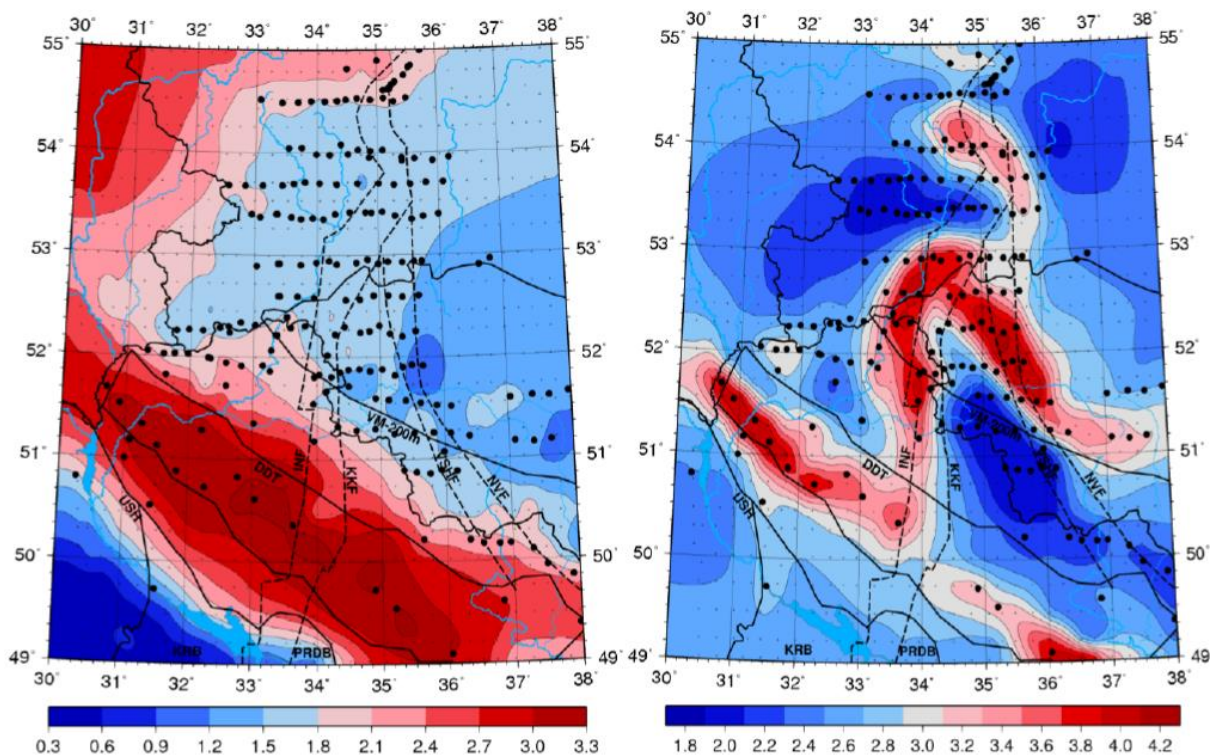


Рис. 7. Карты продольной проводимости ($\lg S$) «осадочного» слоя (слева) и «корового» слоя (справа) по результатам квази-3D инверсии горизонтального магнитного тензора на периоде 400 с, полученного в проекте «Кировоград» [Варенцов и др., 2016].

Примером таких исследований является проект «Кировоград», реализованный по инициативе Ив.М. Варенцова на Восточно-Европейской платформе, в западной части **Воронежской антеклизы**. На рис. 7 представлены некоторые результаты этого проекта в виде карт проводимостей «осадочного» и «корового» слоев. На первой карте ярко видна Днепровско-Донецкая впадина (на юго-западе), а на второй – Кировоградская (в центре), Курская (на востоке) и Барятинская (на севере) коровые аномалии. Интересно, что эти аномалии электропроводности коррелируют с яркими аномалиями потенциальных полей, гравитационного и магнитного.

Новые исследования Ладожской коровой аномалии электропроводности на северо-западе Восточно-Европейской платформы, в пределах **Балтийского щита**, были инициированы Е.Ю. Соколовой. На рис. 8 показан геоэлектрический разрез земной коры вдоль профиля, пересекающего эту аномалию в северо-западном Приладожье. Недавно эта аномалия была также детально исследована юго-восточнее Ладожского озера. По всей вероятности, она маркирует границу двух платформенных блоков: позднеархейского Карельского и раннепротерозойского Свекофенского блока.

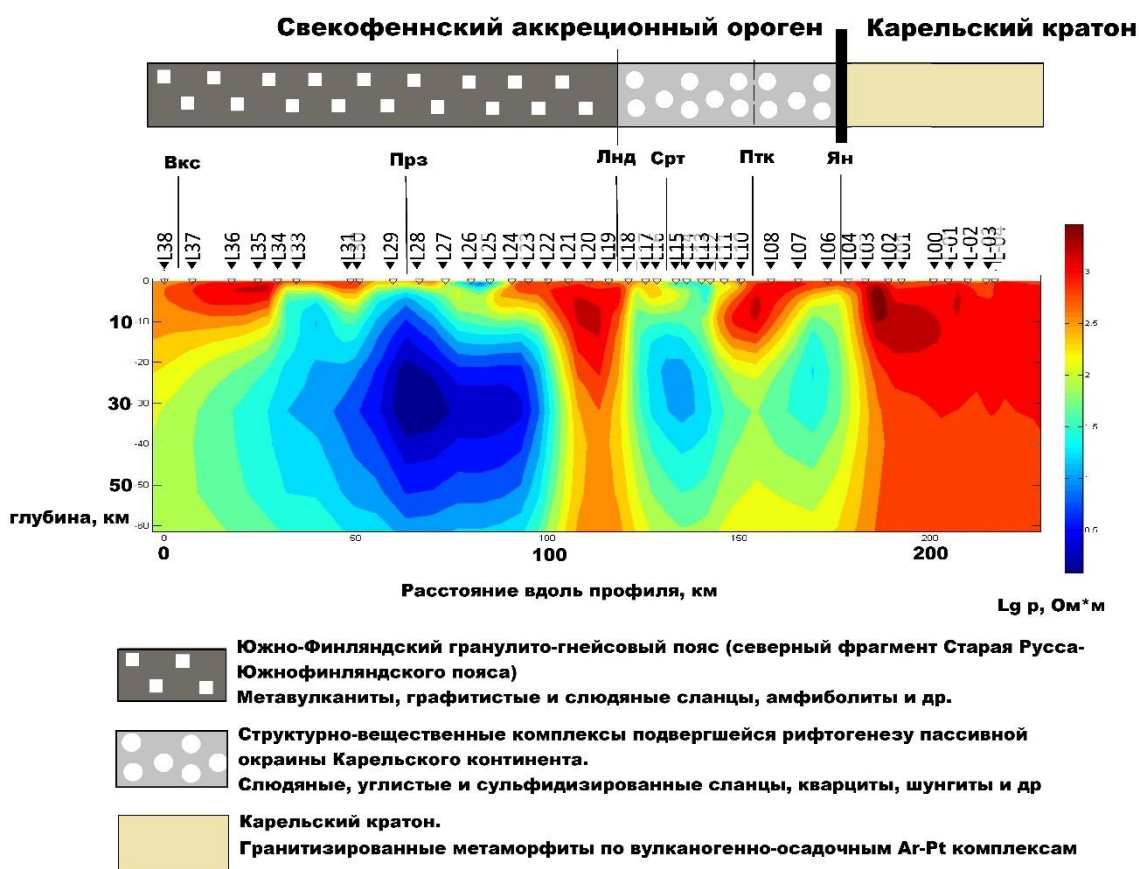


Рис. 8. Профиль «Выборг-Суоярви». Геоэлектрический разрез по результатам 2D инверсии поперечного импеданса, продольного импеданса и типпера. Также показаны тектонические структуры и выходящие на поверхность разломы [Соколова и др., 2016].

На территории России при государственной поддержке развивается сеть региональных геофизических профилей протяженностью от нескольких сотен до первых тысяч км, по которым с шагом порядка 1 км выполняются МТ зондирования. На рис. 9 показан геоэлектрический разрез, построенный специалистами компании «Северо-Запад» по МТ данным вдоль 500-километрового профиля «Уралсейс», который начинается на Восточно-Европейской платформе и пересекает **Уральские горы**. В центральной части профиля располагается проводящая аномалия, по-видимому, связанная с глубинными обводненными разломами. К её выходам на поверхность приурочены крупные месторождения хрома и золота.

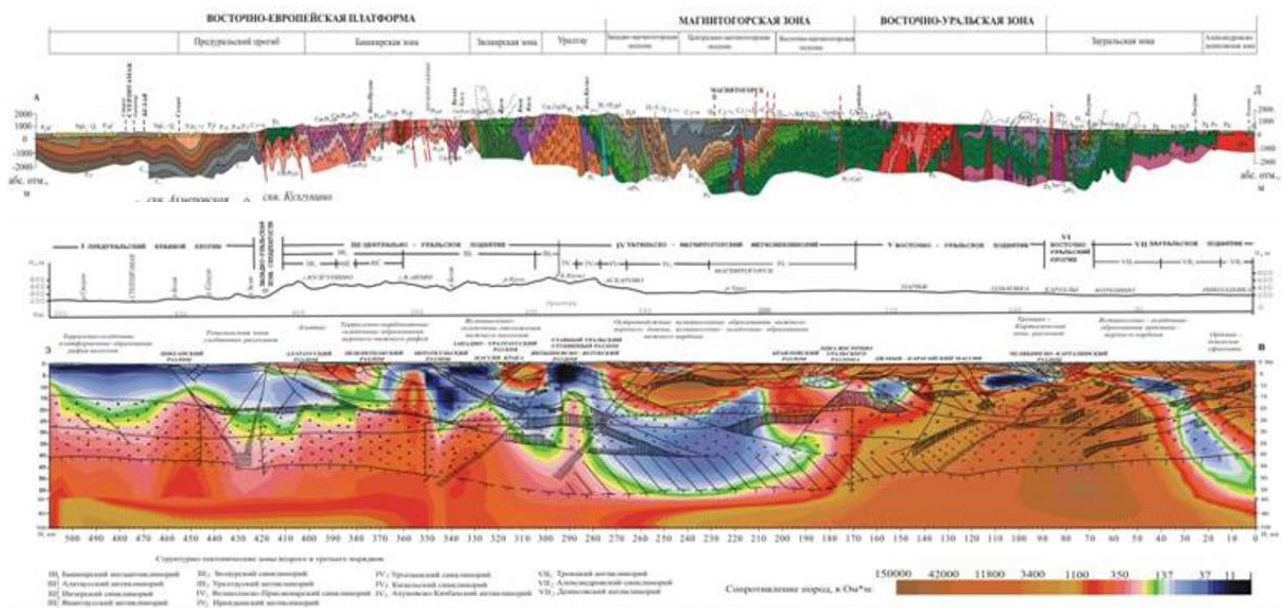


Рис. 9. Профиль «Уралсейс». Вверху – геологический разрез, внизу - геоэлектрический разрез земной коры по результатам 2D инверсии МТ данных и результаты глубинного сейсмического зондирования [Куликов и др., 2003].

Профиль 1-СБ длиной 800 км начинается на Западно-Сибирской плите, пересекает Енисейский тектонический пояс и заканчивается на **Восточно-Сибирской платформе**. Глубинный геоэлектрический разрез вдоль этого профиля (рис. 10) построен специалистами компании «Северо-Запад» по МТ данным. В пределах Западно-Сибирской плиты на фоне большой проводимости осадочного чехла (1000 См) детали строения земной коры не различимы. В районе Енисейского кряжа под приповерхностными метаморфическими высокоомными породами протерозоя находится низкоомная зона, природа которой спорна. На Восточно-Сибирской платформе в средней коре отчетливо выделяется проводящий слой сопротивлением около 100 Ом·м и мощностью 10-15 км. Природа его проводимости, возможно, связана с наличием флюидов в области разрушения пород на глубинах перехода от

хрупкого к пластичному состоянию. Интересно, что положение корового проводника коррелирует с крупнейшим в Восточной Сибири Юрубчено-Тохомским нефтегазовым месторождением (похожая картина наблюдается в районе гигантского Ромашкинского нефтяного месторождения на Восточно-Европейской платформе).

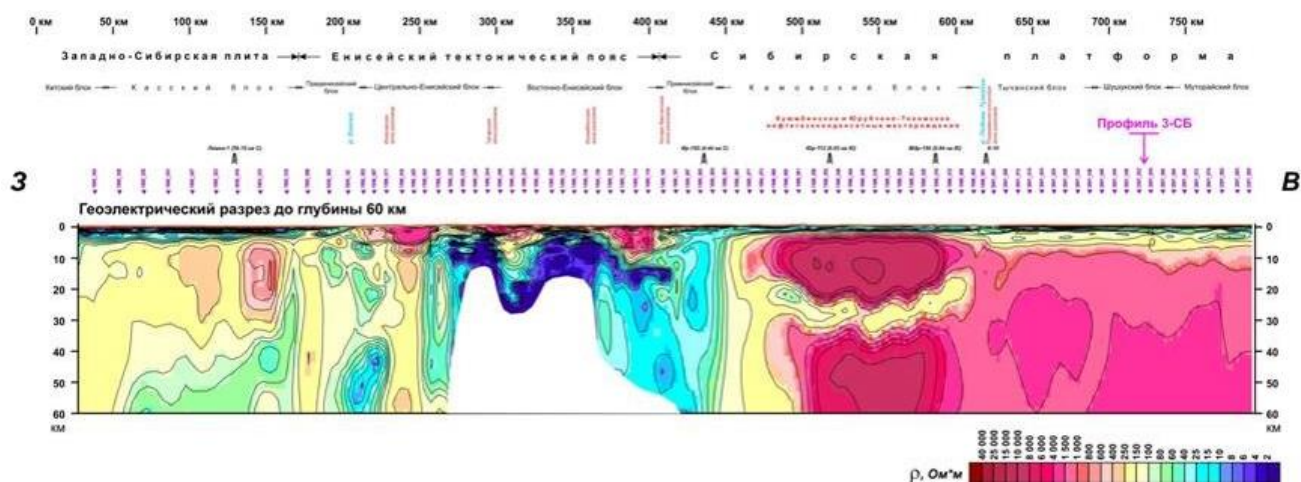


Рис. 10. Профиль «1-СБ». Геоэлектрический разрез земной коры по результатам 1D инверсии МТ данных [Vubnov et al., 2007].

МТ зондирования также успешно применяются при изучении осадочного чехла древних платформ и молодых плит. На рис. 11 приведен геоэлектрический разрез по профилю IV программы «Рифей» длиной 650 км, пересекающему **Московскую синеклизу**, крупную тектоническую структуру в пределах Восточно-Европейской платформы [Vubnov et al., 2007]. На разрезе, построенном с учетом данных бурения и сейсморазведки, видны Солигаличский авлакоген, представляющий собой впадину в фундаменте, и генетически связанное с ним поднятие в осадочном чехле. Благодаря высокоомному слою (экрану), это поднятие ярко проявляется в поперечном импедансе. В то же время продольный импеданс несет информацию о толще под экраном и позволяет выделить интересные с точки зрения их возможной нефтегазоносности проводящие породы девона, венда и рифея. Их мощность в Солигаличском авлакогене оценивается в 2 – 3 км, а сопротивление, составляющее первые единицы Ом·м, указывает на хорошие коллекторские свойства. Высокоомный фундамент в основании разреза, датируемый архейским-раннепротерозойским возрастом, состоит из крупных блоков различного сопротивления. На бортах Московской синеклизы он представлен высокоомными породами предположительно архейского возраста, а в её центральной части – более проводящими, по-видимому, раннепротерозойскими.

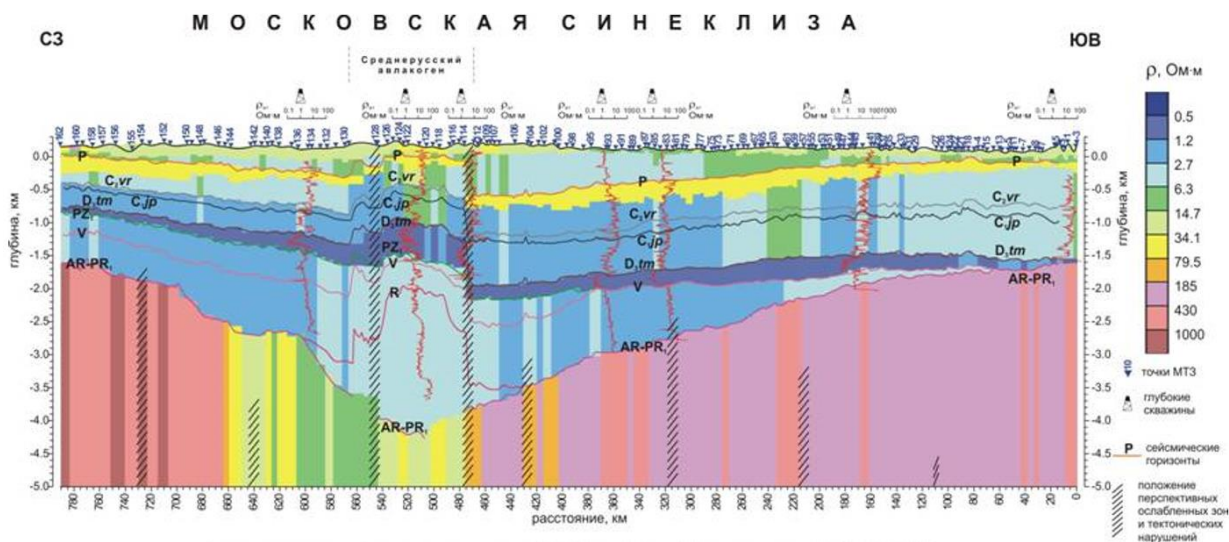


Рис. 11. Геоэлектрический разрез осадочного чехла по результатам 1D интерпретации МТ данных по профилю вкост Московской синеклизы [Vibnov et al., 2007].

На рис. 12 представлен геоэлектрический разрез по профилю, расположенному в **Западном Предкавказье** [Vibnov et al., 2007]. Он проходит от Черного моря вглубь Скифской плиты, пересекая Кавказские горы и Кубанский прогиб. Геоэлектрический разрез дополнен сейсмическими горизонтами. Примечательной особенностью этого разреза является то, что у северной границы Кубанского прогиба выделяется неизвестный ранее прогиб, заполненный проводящими породами, предположительно терригенными образованиями юрского возраста.

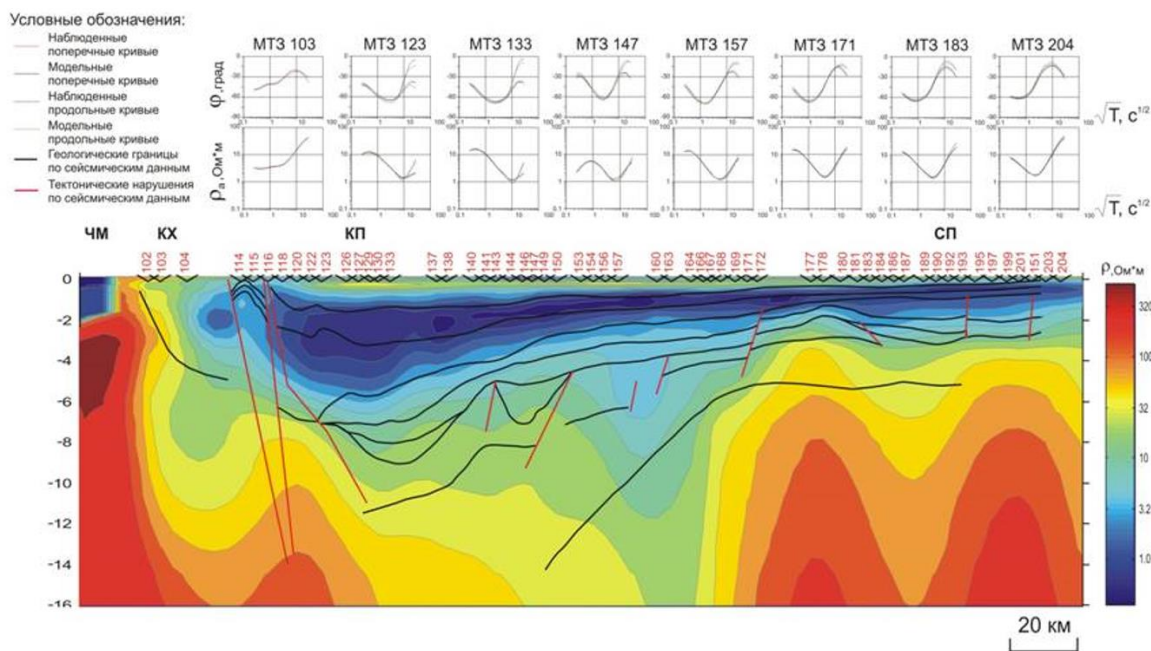


Рис. 12. Геоэлектрический разрез по результатам 2D инверсии МТ данных и сейсмические границы по профилю от Чёрного моря (ЧМ) через Кавказский хребет (КХ), Кубанский прогиб (КП) и Скифскую плиту (СП) [Vibnov et al., 2007].

Приведенные примеры показывают, что на своем пути развития, занявшем более полувека, МТ метод прошел путь от трудоемкого грубого способа выявления ярких аномалий глубинной электропроводности до современной технологии построения детальных геоэлектрических моделей.

В настоящее время применяются следующие **модификации МТ метода**, охватывающие широкий **диапазон частот** и, соответственно, **диапазон изучаемых глубин** (рис. 13). В наиболее широком частотном диапазоне используется метод МТ зондирования (МТЗ), основанный на простой плосковолновой модели поля и не требующий искусственных источников. Его модификациями являются глубинное МТЗ (частоты 10^{-4} - 10^{-2} Гц), разведочное МТЗ (10^{-3} - 10^2 Гц), малоглубинные аудио-МТЗ и радио-МТЗ (10^1 - 10^4 Гц и 10^4 - 10^6 Гц). Метод частотного зондирования (ЧЗ), использующий искусственный источник, обеспечивают повышенную точность, особенно при сильных промышленных помехах, что в ряде случаев обосновывает его применение вместо МТЗ.

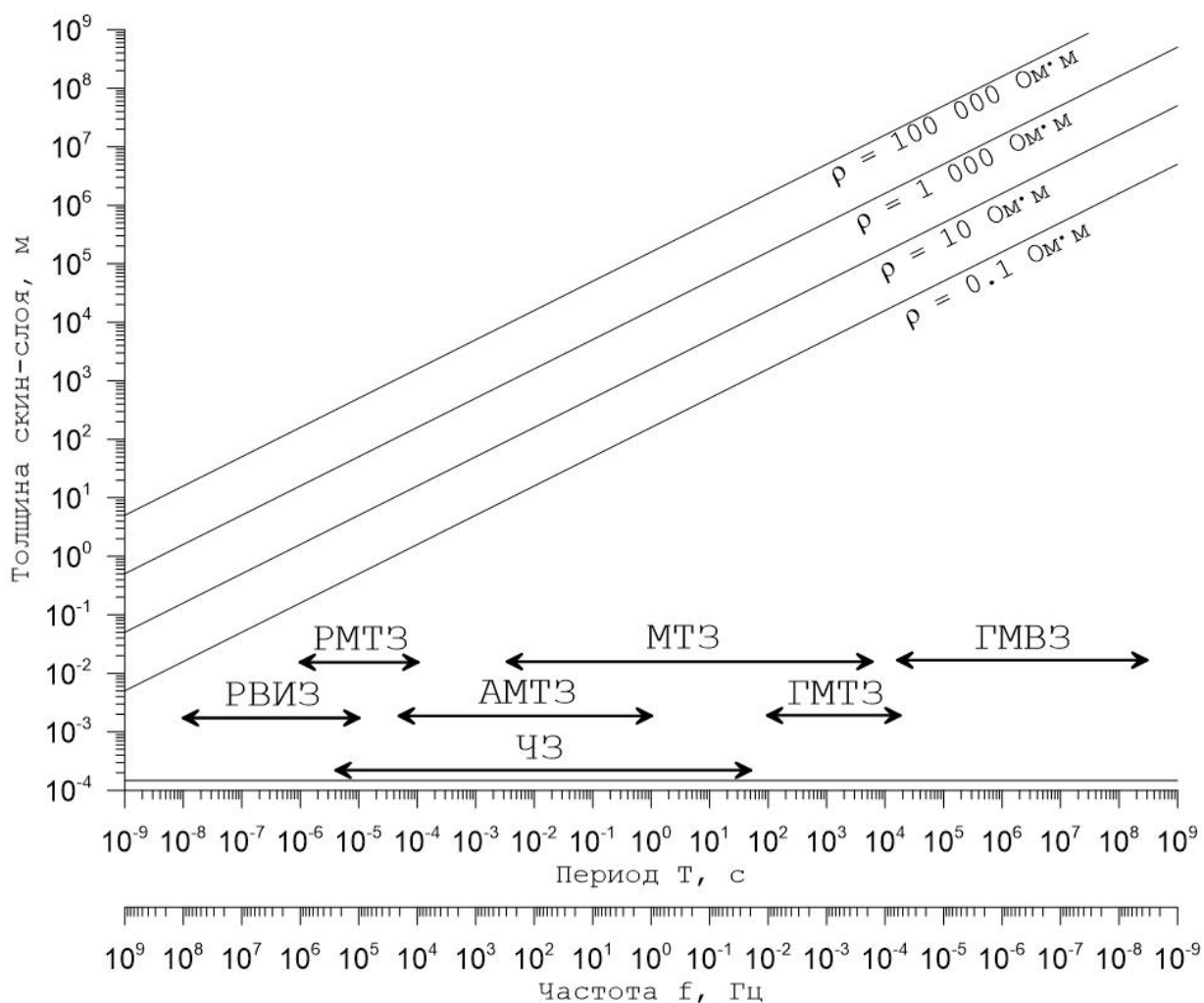


Рис. 13. Диапазоны частот методов ЭМ зондирования и соответствующие глубины исследования (толщины скин-слоя) при различных сопротивлениях однородной среды.

Глубинность ЭМ зондирований принято оценивать, как толщину скин-слоя, в котором поле затухает в $e \approx 2.7$ раз. Толщина скин-слоя h_s (м) связана с сопротивлением среды ρ (Ом·м) и периодом колебаний поля T (с) по формуле: $h_s = \sqrt{10^7 \cdot \rho \cdot T} / (2\pi)$. На рис. 13 представлены зависимости толщины скин-слоя от периода для четырёх значений сопротивления среды. Горизонтальными линиями показаны примерные частотные диапазоны ЭМ методов. Половину методов составляют магнитотеллурические: РМТЗ, АМТЗ, МТЗ, ГМТЗ. В области длинных периодов их дополняет глубинное магнитовариационное зондирование (ГМВЗ). Из методов с управляемыми источниками наиболее высокочастотным является метод радиоволнового интерференционного зондирования (РВИЗ), далее следует ЧЗ. ЭМ методы (если учитывать только низкочастотные, без РВИЗ) перекрывают диапазон периодов примерно от 10^{-6} до более чем 10^8 с, что при сопротивлении среды $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ отвечает диапазону глубин примерно от метра до тысячи километров.

На рис. 14 приведен **общий граф современных МТ исследований** (глубинных, разведочных, малоглубинных). Кратко рассмотрим содержание его элементов.

I. Проектирование исследований. Осуществляется сбор геолого-геофизической информации, составляются априорные модели, проводится математическое моделирование ожидаемых аномалий. Оценивается доступность точек наблюдения и уровень помех. В итоге выбирается оптимальная технология наблюдений.

II. Полевые наблюдения. Вначале проводятся регламентные работы по подготовке аппаратуры (калибровка, тест на идентичность и т.д.). Основную часть работ составляют измерения в рядовых точках. Результатом этапа является набор данных, представляющий собой наибольшую ценность, будь то научный эксперимент или производственные работы.

III. Обработка данных. На этом этапе происходит переход от временных рядов компонент поля в частотную область, к комплексным компонентам магнитотеллурических и магнитовариационных матриц $[Z]$, $[W]$, $[M]$, $[T]$, не зависящим от источника. Важной составляющей является подавление промышленных и других помех, с использованием синхронных записей и с помощью статистических методов.

IV. Анализ и интерпретация данных.

1). Оценка и подавление приповерхностных искажений. Применяются методы нормализации кривых, т.е. их смещения к определённому уровню, или методы декомпозиции данных, т.е. вычисления передаточных функций, устойчивых к приповерхностным искажениям.

2). Оценка размерности и простираения структур. Анализируются частотные разрезы инвариантных параметров, карты полярных и векторных диаграмм. Локализируются основные

структуры, оценивается их вытянутость, для 2D инверсии необходимо определить простирание. В результате выбирается методика дальнейшей интерпретации данных.

3). Формирование набора инвертируемых компонент. Для 1D инверсии обычно выбирается инвариантная эффективная компонента Z_{ef} . Для 2D инверсии данные поворачиваются к главным направлениям, обычно средним по профилю, в этом случае положение точек наблюдения проецируется на профиль соответствующего азимута.

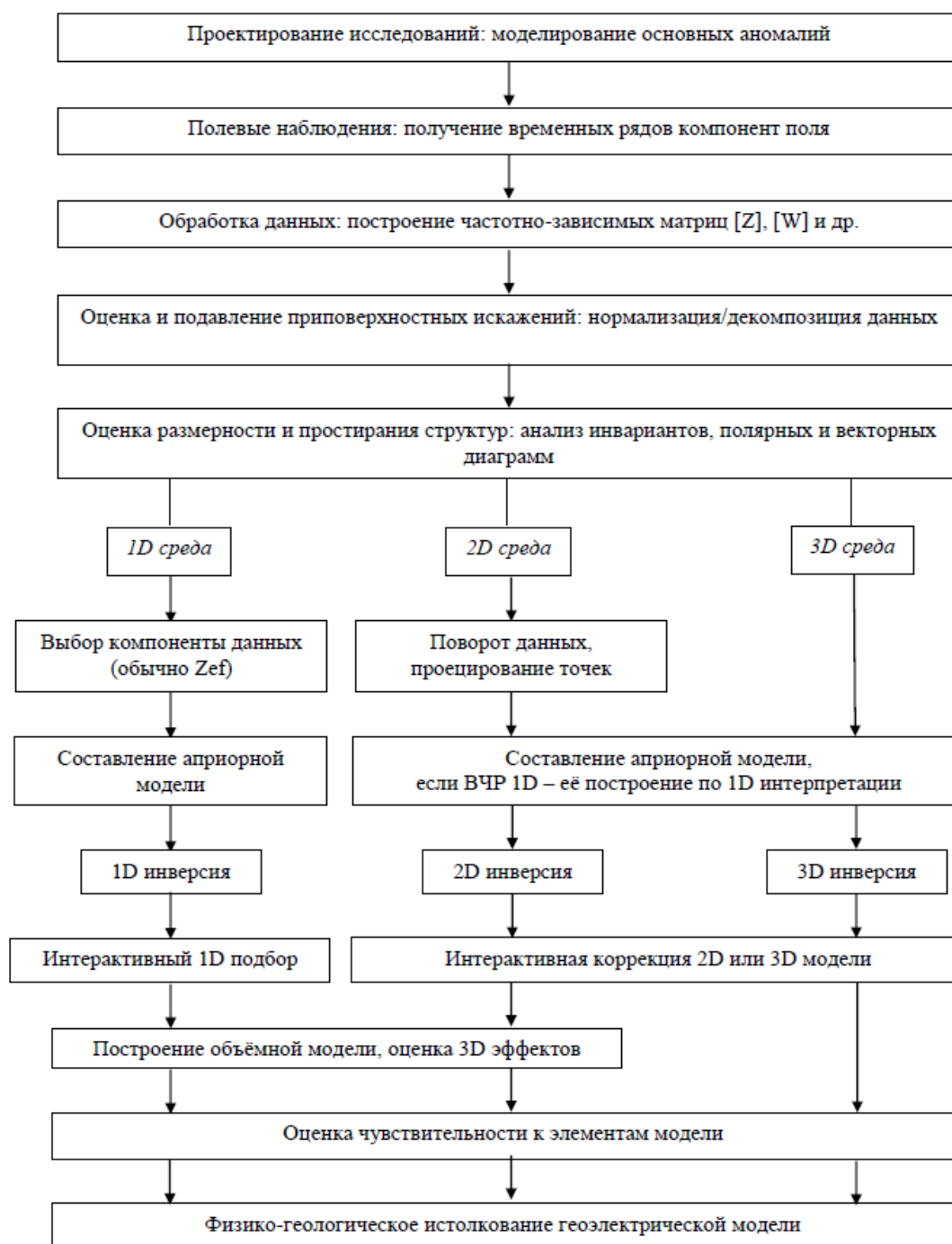


Рис. 14. Общий граф магнитотеллурических исследований.

4). Составление априорной модели. Задается сетка по глубине и, в зависимости от выбранной размерности, по горизонтали. На основе имеющейся информации задаются априорные значения сопротивления. Если верхняя часть разреза характеризуется 1D строением, при 2D и 3D инверсии в априорную модель может быть включен результат 1D интерпретации по верхней части разреза.

5). Автоматическая инверсия данных. Строится геоэлектрическая модель, согласующаяся с наблюдаемыми данными и близкая к априорной модели. При этом часть параметров модели может быть жёстко или полужёстко закреплена. Чаще всего применяется сглаживающая инверсия, хотя применяются и другие виды стабилизации решения.

6). Интерактивная коррекция модели. При 1D интерпретации применяется широко и часто без предварительной автоматической инверсии, обеспечивая простой учёт априорной информации о глубинах залегания границ. При 2D и 3D трудоемка и применяется реже, но позволяет получить наглядную генерализованную модель для дальнейшего истолкования.

7). Оценка трёхмерных эффектов. Может выполняться на основе 3D моделирования в случае площадных исследований при использовании 1D и 2D методов инверсии. При профильных исследованиях и использовании 1D инверсии может осуществляться оценка двумерных эффектов с помощью 2D моделирования.

8). Оценка чувствительности к элементам модели. Составляются варианты итоговой модели, из которых поочерёдно исключаются её ключевые элементы (их сопротивления заменяются на фоновые значения). По изменению невязок оценивается необходимость их включения в модель.

9). Физико-геологическое истолкование. Геоэлектрическая модель анализируется в комплексе с другой геолого-геофизической информацией совместно со специалистами в области решения поставленной геологической задачи. Делается заключение по решению этой задачи.

В самом общем виде **результаты применения МТ метода** при глубинных и разведочных исследованиях можно сформулировать следующим образом.

1. Большинство протяжённых аномалий электропроводности в консолидированной земной коре маркирует древние или современные границы коровых блоков, эти зоны благоприятны для повышенного теплопереноса и участвуют в формировании геодинамической активности. Соотношение вклада электропроводящих минералов и вклада флюидов в электропроводность аномалий для тектонически стабильных регионов выше, чем для активных. В последних также присутствуют аномалии, которые обусловлены плавлением горных пород и могут быть не связаны с тектоническими границами.

2. Решён ряд практических геологических задач, характеризующихся разными типами изучаемых объектов, масштабами и глубинами исследования: выделение нефтегазоперспективных структур, оконтуривание областей различных типов оруденения, разведка геотермальных зон, изыскания под строительство объектов, оценка ресурсов подземных вод.

Цитируемая литература

Жамалетдинов А.А. Графит в земной коре и аномалии электропроводности. Физика Земли, 1996, № 4, с. 12-29.

Варенцов И.М., Иванов П.В., Ковачикова С., Лозовский И.Н. Массив МТ/МВ зондирований KIROVOGRAD: квази-3D инверсия горизонтальных МВ откликов. Вопросы естествознания, 2016, № 4(12), с. 47-52.

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.

Bubnov V.P., Yakovlev A.G., Aleksanova E.D., Yakovlev D.V., Berdichevsky M.N., Pushkarev P.Yu. Regional magnetotelluric explorations in Russia. In "Methods in Geochemistry and Geophysics, 40: Electromagnetic sounding of the Earth's interior", edited by Spichak V.V. Elsevier B.V., 2007, p. 351-367.