

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ  
НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД ПРИМЕНИТЕЛЬНО  
К РЕШЕНИЮ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

*Пушкарев П. Ю.*

*Геологический факультете МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия*

**INTERPRETATION OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC  
SOUNDINGS OF INHOMOGENEOUS MEDIA  
APPLICABLE TO THE SOLUTION OF GEOLOGICAL PROBLEMS**

*Pushkarev P. Yu.*

*Faculty of Geology of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**Abstract**

Generalized geoelectrical models of the following geological objects are constructed: subduction zone, crustal anomalies under the sedimentary basin, anisotropic crustal anomalies, platform sedimentary cover, hydrocarbon deposits on the shelf, ore bodies, geothermal deposits, weakened zones in rock formations. Based on the application of analysis and inversion methods to synthetic data calculated for these models, the possibilities of EM sounding methods are evaluated and optimal interpretation techniques are chosen.

A general methodology for analyzing and interpreting MT data is formulated and includes the following stages: suppression of near-surface distortions; evaluation of the dimension and the strike of structures; formation of a set of inverted components; compilation of a priori model; automatic data inversion; interactive model correction; evaluation of three-dimensional effects; assessment of the sensitivity to the elements of the model; physical-geological interpretation.

Most extended anomalies of electrical conductivity in the consolidated earth's crust mark the ancient or modern boundaries of crustal blocks, these zones are favorable for increased heat and mass transfer and participate in the formation of geodynamic activity. The ratio of the contribution of electron-conducting minerals and the contribution of fluids to the conductivity of anomalies for tectonically stable regions is higher than for active ones. In the latter, anomalies are also present, which are due to the melting of rocks and may not be associated with tectonic boundaries.

Due to the choice of optimal methods for interpreting MT data, several practical geological problems, characterized by different types of studied objects, scales and depths of the study were solved: identification of oil and gas prospective structures, delineation of ore mineralization areas, exploration of geothermal zones, survey for the construction of facilities, groundwater exploration.

## Введение

Тема повышения эффективности интерпретации данных низкочастотных электромагнитных (ЭМ) зондирований не теряет своей актуальности. На данный момент тому есть две основные причины.

Первая связана с быстрым развитием вычислительной и измерительной техники, обусловившим возможности получения многокомпонентных высокоточных данных в широком частотном диапазоне по густой сети наблюдения и применения ресурсоемких методов обработки и интерпретации данных, в частности, многомерных методов инверсии: 2D (на персональных компьютерах) и 3D (на компьютерных кластерах). Появляются многочисленные новые подходы и программы для интерпретации данных, позволяющие проводить ее на высоком уровне.

Вторая причина заключается в недостаточной востребованности и понимании результатов ЭМ зондирований геологами и геофизиками. В области глубинных исследований этому способствует недостаточно изученная природа аномалий электропроводности, расположенных на недоступных для бурения глубинах.

Таким образом, актуальным является как внедрение новых математических методов интерпретации, так и повышение качества ее физико-геологической результативности. Последнее достигается использованием априорной информации, комплексированием разных методов, истолкованием результатов с оценкой надежности и детальности построений.

Представляется полезным подойти к проблеме повышения эффективности интерпретации ЭМ зондирований максимально широкого с точки зрения диапазонов частот, глубин, решаемых задач. Как известно, несмотря на существенные различия аппаратурных комплексов и методик наблюдений, и глубинные и малоглубинные низкочастотные ЭМ технологии основаны на единой квазистационарной модели ЭМ поля и могут использовать общие методы интерпретации данных. В то же время, при решении разных задач приоритет может даваться разным методам, например, при изучении осадочного бассейна может оказаться оправданным одномерный (1D) подход, зоны субдукции – двухмерный (2D), рудного месторождения – трехмерный (3D). **Оптимальный для каждой конкретной ситуации арсенал методов и приемов (стратегия интерпретации) может быть выбран как частный случай общей методики на основе имеющегося опыта и анализа полученных данных.**

### Современное состояние методов электромагнитного зондирования земной коры

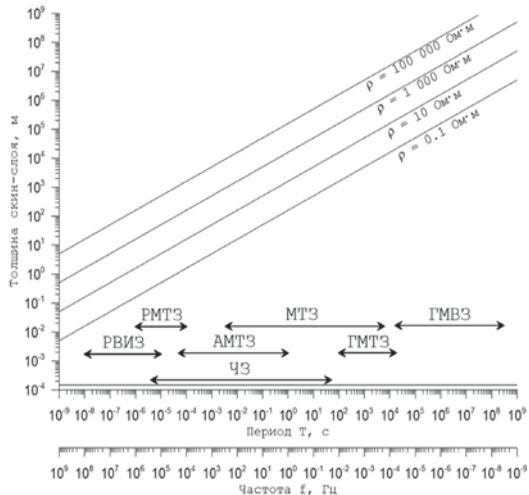
Рассмотрим частотные диапазоны и глубинность применяемых методов зондирования. Эту глубинность принято оценивать, как толщину скин-слоя, в пределах которого поле затухает в  $\epsilon \approx 2.7$  раз. Толщина скин-слоя (м) связана с сопротивлением среды (Ом·м) и периодом колебаний поля (с) по формуле:

$$h_s = \frac{\sqrt{10^7 \cdot \rho \cdot T}}{2\pi}.$$

На рис. 1 показаны зависимости толщины скин-слоя от периода для четырех значений сопротивления среды. Горизонтальные линии отмечают примерные частотные диапазоны ЭМ методов. Большинство составляют методы магнитотеллурического зондирования: РМТЗ (радио), АМТЗ (аудио), МТЗ, ГМТЗ (глубинного). В области длинных периодов их дополняет ГМВЗ (глубинного магнитовариационного зондирования). Из методов с управляемыми источниками более высокочастотным является метод РВИЗ (радиоволнового интерференционного зондирования), далее следует ЧЗ (частотного зондирования). Последнему по глубинности примерно соответствует метод ЗС (зондирования становлением поля) во временной области.

Рис. 1. Диапазоны частот методов ЭМ зондирования и соответствующие глубины исследования (толщины скин-слоя) при различных сопротивлениях однородной среды

Fig. 1. Frequency bands of the EM sounding methods and corresponding depths of the investigation (thickness of the skin layer) for various resistivities of a homogeneous medium



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.

Обобщение опыта применения низкочастотных ЭМ зондирований показывает, что в наиболее широком частотном диапазоне используется метод 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). Методы ЧЗ и ЗС, использующие искусственный источник, обеспечивают повышенную точность при сильных промышленных помехах, что в ряде случаев обосновывает их применение вместо МТЗ.

### Методика анализа и интерпретации магнитотеллурических данных

На рис. 2 представлен общий граф магнитотеллурических исследований. Рассматривается место методов анализа и интерпретации МТ данных в последовательности этапов МТ исследований (глубинных, разведочных, малоглубинных).

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 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 определенному уровню,

или декомпозиции данных, т.е. вычисления передаточных функций, устойчивых к этим искажениям.

2). Оценка размерности и простириания структур. Анализируются частотные разрезы инвариантных параметров, карты полярных и векторных диаграмм. Локализуются основные структуры, оценивается их вытянутость, для 2D инверсии необходимо определить простириание. В результате выбирается методика дальнейшей интерпретации данных.

3). Формирование набора инвертируемых компонент. Для 1D инверсии обычно выбирается инвариантная 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.

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 (ВЧР) характеризуется 1D строением, при 2D и 3D инверсии в априорную модель может быть включен результат 1D интерпретации по ВЧР.

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

6). Интерактивная коррекция модели. При 1D интерпретации применяется широко и часто без предварительной автоматической инверсии, обеспечивая простой учет 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 трехмерных 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 двухмерных эффектов с помощью 2D моделирования.

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

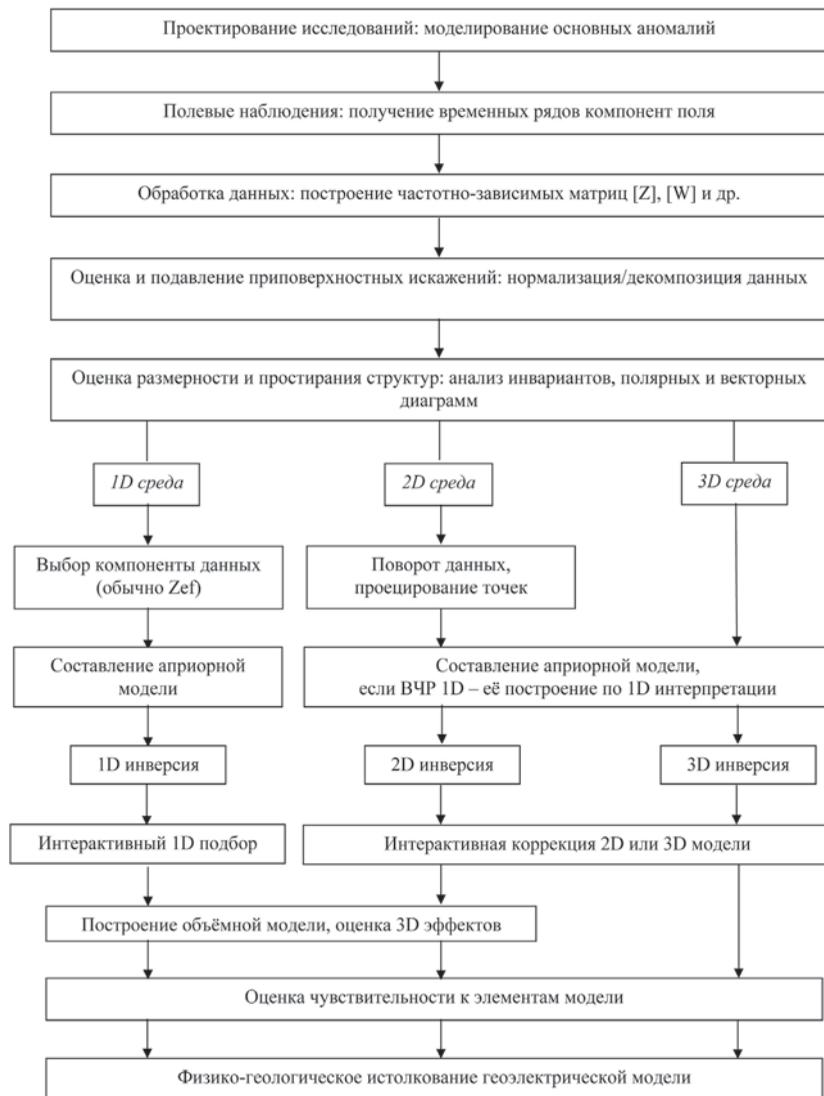


Рис. 2. Общий граф магнитотеллурических исследований

Fig. 2. General graph of magnetotelluric studies

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 ее решению.

Таким образом, достоверность и детальность результатов магнитотеллурики существенно зависят от методики интерпретации данных. Она должна включать в себя методы анализа данных для выявления в них основных аномалий и приповерхностных искажений, для оценки размерности среды и простираения структур, а также набор методов инверсии данных для разных размерностей и вариантов параметризации модели среды. Выбор методов инверсии осуществляется с учетом опыта интерпретатора на основе анализа данных и на основе априорных сведений о геологическом строении изучаемого района.

### **Некоторые результаты глубинных геоэлектрических исследований**

Построенные нами глубинные геоэлектрические модели разных регионов демонстрируют возможности магнитотеллурики решать следующие задачи:

- в пределах древних платформ, выявлять протяженные коровые аномалии, в основном обусловленные электропроводящими минералами в разделяющих блоки земной коры шовных зонах, и генетически связанные с месторождениями полезных ископаемых (Барятинская и Ладожская аномалии);
- в областях перехода от древних к молодым платформам, изучать их строение и определять разницу свойств земной коры и верхней мантии под древними и молодыми структурами (Транс-Европейская шовная зона);
- в зонах коллизии литосферных плит, оценивать флюидонасыщенность глубинных слоев и разломов, оказывающую влияние на сейсмичность (Киргизский Тянь-Шань и Гарвальские Гималаи);
- в зонах субдукции, выявлять пути распространения флюидов и расплава в земной коре и верхней мантии, в том числе так же для лучшего понимания сейсмической активности (Каскадная зона субдукции).

Кроме того, необходимо отметить задачи изучения континентальных и океанических рифтовых зон, в которых также выявлены яркие глубинные проводящие аномалии.

### **Примеры применения разведочной и малоглубинной геоэлектрики**

Наш практический опыт позволяет сделать следующие выводы о задачах, решаемых прикладной геоэлектрикой.

ЭМ зондирования успешно применяются при нефтегазовых исследованиях. Они позволяют изучать региональную структуру осадочных бассейнов, выделять перспективные структуры. Зондирования с гальваническим возбуждением при благоприятных геологических условиях, которые в основном встречаются на шельфе, дают возможность поиска и картирования залежей. Дополнительную информацию об ореолах вторичных изменений над залежами дает оценка поляризационных параметров.

В рудной геофизике ЭМ методы играют ведущую роль, как на этапе прямого или косвенного поиска месторождений, так и на разведочном этапе для оконтуривания рудных тел и изучения геологического строения. Получаемые геоэлектрические разрезы отражают положение высокоомных интрузий, проводящих рудных тел, зон гидротермальных изменений, тектонических нарушений и т.д.

Большую роль играют ЭМ зондирования при изучении геотермальных ресурсов. Они позволяют выделять трещинноватые водонасыщенные зоны в скальных породах, области развития гидротермальной минерализации и частичного плавления горных пород. По мере расширения территорий эксплуатации геотермальных ресурсов в районы с более низкими глубинными температурами ЭМ зондирования по-прежнему дают полезную информацию о геоэлектрическом строении района.

В малоглубинной геофизике, решающей задачи в области инженерной геологии, гидрогеологии, геокриологии, низкочастотные ЭМ методы в основном используются при изысканиях под строительство глубоководных тоннелей, изучении глубоких горизонтов подземных вод, картировании подошвы многолетнемерзлых пород.

### **Основные результаты**

1. Построены обобщенные геоэлектрические модели следующих геологических объектов: зона субдукции, коровые аномалии под осадочной впадиной, анизотропные коровые аномалии, платформенный осадочный чехол, залежь углеводородов на шельфе, рудные тела, геотермальные месторождения, ослабленные зоны в скальных породах. На основе применения методов анализа и инверсии к синтетическим данным, рассчитанным для этих моделей, оценены возможности методов ЭМ зондирования и выбраны оптимальные методики интерпретации.

2. Сформулирована общая методика анализа и интерпретации МТ данных, включающая следующие этапы: оценка и подавление приповерхност-

ных искажений; оценка размерности и простираения структур; формирование набора инвертируемых компонент; составление априорной модели; автоматическая инверсия данных; интерактивная коррекция модели; оценка трехмерных эффектов; оценка чувствительности к элементам модели; физико-геологическое истолкование.

3. Большинство протяженных 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.

4. За счет выбора оптимальных методик интерпретации МТ данных, решен 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.