

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Пушкарев П.Ю.

pavel_pushkarev@list.ru

Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Магнитотеллурический (МТ) метод геофизики, в широком понимании, основан на измерении низкочастотного электромагнитного поля Земли, определении компонент передаточных матриц (тензора импеданса $[Z]$, матрицы Визе-Паркинсона $[W]$, теллурического тензора $[T]$, магнитного тензора $[M]$) и их интерпретации для оценки электропроводности коры и мантии Земли. Электропроводность горных пород существенно зависит от наличия минералов с электронной проводимостью (графит, сульфиды), флюидов (особенно при их высокой минерализации) и расплава. Это делает МТ метод одним из основных инструментов изучения глубинного строения геодинамически активных регионов.

Идея метода МТ зондирования была предложена академиком А.Н. Тихоновым в 1950 году и доведена до практической реализации в рамках 1D модели среды французским геофизиком Л. Каньяром в 1953 году.

Выдающийся вклад в дальнейшее развитие магнитотеллурики внесли советские и российские учёные Марк Наумович Бердичевский, Леонид Львович Ваньян и Владимир Иванович Дмитриев (Рисунок 1).



Рисунок 1 – профессора М.Н. Бердичевский (1923-2009), Л.Л. Ваньян (1932-2001) и В.И. Дмитриев (1932-2020)

М.Н. Бердичевский обосновал и внедрил методы теллурических токов (МТТ), магнитотеллурического профилирования (МТП) и зондирования (МТЗ). Он предложил использовать тензор импеданса $[Z]$, связывающий компоненты электрического и магнитного полей в горизонтально-неоднородной среде. В дальнейшем он внёс решающий вклад в разработку методики интерпретации МТЗ неоднородных сред. Начав с применения магнитотеллурики в нефтегазовых исследованиях, он затем возглавлял работу по созданию карты коровых проводящих аномалий для территории СССР.

Л.Л. Ваньян заложил основы 1D интерпретации электромагнитных зондирований, как магнитотеллурических, так и с искусственным источником. Впоследствии он инициировал глубинные МТ исследования литосферы и астеносферы океанов и континентов, обосновал механизмы формирования коровых и мантийных аномалий повышенной электропроводности.

В.И. Дмитриев был пионером в области решения прямых 2D и 3D задач МТ зондирований, применив для этого метод интегральных уравнений. Это позволило изучить эффекты в МТ данных, связанные с горизонтальной неоднородностью среды, и существенно способствовало развитию методики интерпретации МТ данных. Кроме того, В.И. Дмитриев внёс огромный вклад в развитие теории решения обратных задач геофизики, продолжив работы академика А.Н. Тихонова в этом направлении.

За несколько последних десятилетий было разработано множество способов анализа, трансформации, моделирования и инверсии МТ-данных. Целью настоящей работы является построение общего графа МТ исследований, включающих эти способы (Рисунок 2). Рассмотрим последовательно его этапы.

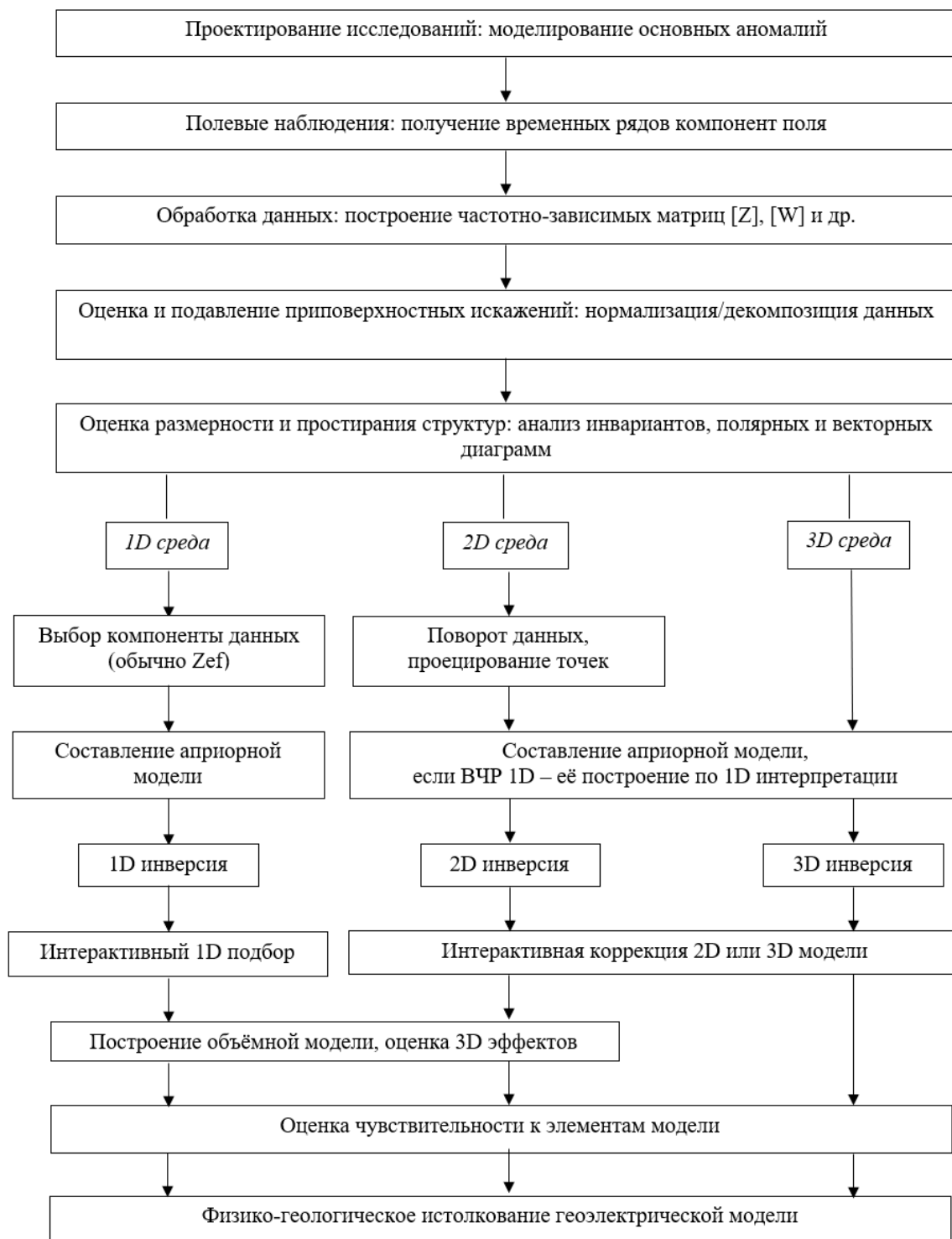


Рисунок 2 – Общий граф магнитотеллурических исследований

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.

Полевые наблюдения. Вначале проводятся регламентные работы по подготовке аппаратуры (калибровка, тест на идентичность и т.д.). Основную часть работ составляют измерения в рядовых точках. Зондирования, как правило, выполняются по профилям, ориентированным вкрест основных тектонических структур. Результатом этапа является набор данных, представляющий собой наибольшую ценность, будь то научный эксперимент или производственные работы.

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 параметров возбудителя поля (системы сторонних токов). Важной составляющей является подавление промышленных и других помех, с использованием синхронных записей и с помощью статистических методов.

Всё последующую работу организационно можно отнести к этапу, называемому **интерпретация данных**. В общем случае он является довольно объёмным и может включать множество подэтапов. Поскольку в данной работе акцентируется внимание именно на методике интерпретации данных, рассмотрим их подробнее.

Оценка и подавление приповерхностных искажений. Применяются методы нормализации кривых кажущегося сопротивления и декомпозиции тензора импеданса. Нормализация кривых, т.е. их смещение к определённому уровню, может выполняться на основе среднего уровня кривых на участке, или уровня кривой индукционного зондирования без использования электрического поля (зондирование становлением поля с двухпетлевой установкой или глубинное магнитовариационное зондирование). Методы декомпозиции $[Z]$ позволяют выделить направления простирания глубинных структур и получить фазовые характеристики, свободные от влияния приповерхностных искажений (методы Бара, Грума-Бэйли, фазового тензора).

Оценка размерности и простирания структур. Анализируются частотные разрезы инвариантных параметров, карты полярных и векторных диаграмм. Значения параметров неоднородности и асимметрии среды позволяют выделить области пространства и диапазоны периодов, в которых применима 1D, 2D или 3D модель среды. Локализируются основные структуры, оценивается их вытянутость, для 2D инверсии необходимо определить простирание. В результате выбирается методика дальнейшей инверсии данных.

Формирование набора инвертируемых компонент. Для 1D инверсии выбирается одна компонента, чаще всего инвариантная Z_{ef} (эффективный импеданс). Для 2D инверсии данные поворачиваются к главным направлениям, обычно средним по профилю, для определения компонент тензора импеданса и других матриц, относящихся к E-поляризации и H-поляризации. Кроме того, в этом случае положение точек наблюдения проецируется на профиль соответствующего азимута.

Составление априорной модели. Задаётся сетка по глубине и, в зависимости от выбранной размерности, по горизонтали. На основе имеющейся информации задаются априорные значения сопротивления. Если верхняя часть разреза (ВЧР), соответствующая осадочному чехлу, характеризуется 1D строением, при 2D и 3D инверсии в априорную модель может быть включен результат 1D инверсии высокочастотных данных.

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, обеспечивающая плавные изменения электропроводности с глубиной и по горизонтали. Однако применяются и другие виды стабилизации решения, такие как блочная (когда подбираются сопротивления и геометрия однородных слоёв и блоков) или фокусирующая (допускающая нарушения гладкости в ограниченных объёмах).

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.

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 двухмерных эффектов с помощью 2D моделирования.

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. Иногда оценивается чувствительность к каждой ячейке модели путём автоматического перебора всех ячеек и придания в них приращений электропроводности.

Физико-геологическое истолкование. Геоэлектрическая модель анализируется в комплексе с другой геолого-геофизической информацией совместно со специалистами в области решения поставленной геологической задачи. Может выполняться оценка пористости и других параметров на основе полученных значений электропроводности. Делается заключение по решению этой задачи.

Кратко обсудим некоторые **вопросы комплексирования** магнитотеллурического и других геофизических методов. Их оптимальный комплекс выбирается на этапе проектирования исследований на основе проявления тех или иных особенностей строения среды в геофизических полях и с учётом имеющихся практических (в т.ч. экономических) возможностей применения методов. Зачастую некоторые геофизические данные доступны априорно (например, карты потенциальных полей). Существенная экономия времени и средств происходит при проведении совместных наблюдений несколькими методами.

Активно развиваются алгоритмы и программы для **совместной инверсии** МТ и других геофизических данных. Последовательная инверсия данных разных методов применяется давно и довольно успешно, при этом, например, положение геологических границ (структурный каркас) восстанавливается по сейсмическим данным на первом этапе, а электропроводность слоев оценивается по МТ данным на втором этапе. Перспективы параллельной инверсии пока исследуются, при этом применяются подходы, основанные как на предположении о схожем характере пространственного изменения свойств среды (близости их градиентов и др.), так и на корреляционных связях различных физических свойств (электрических, упругих и иных характеристик).

В заключение подчеркнём, что 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 простираня 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 априорных сведений о геологическом строении изучаемого района.

Множество практических примеров свидетельствует, что современная методика интерпретации данных магнитотеллурики позволяет с высокой степенью детальности решать самые разнообразные фундаментальные и прикладные задачи, от изучения глубоких горизонтов земной коры и верхней мантии до поиска и разведки месторождений полезных ископаемых и решения задач инженерной геофизики.