

ОТЗЫВ официального оппонента Белявского В. В.
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических
наук Суконкина Максима Алексеевича «Подавление влияния
приповерхностных неоднородностей на магнитотеллурические данные»
по специальности 1.6.9. Геофизика

Диссертационная работа Суконкина М.А. направлена на развитие методов обработки магнитотеллурических наблюдений и построения геоэлектрических моделей. Им разработаны новые подходы к представлению результатов методов теллурических токов и снятию искажающих эффектов с кривых кажущегося сопротивления и теллурических матриц.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 98 наименований и списка работ автора, опубликованных по теме диссертации. Текст работы составляет 157 страниц, она содержит 67 рисунков и 7 таблиц. Диссертация и автореферат оформлены по действующим стандартам и правилам, изложены грамотным русским языком.

Актуальность рассматриваемой диссертации обусловлена необходимостью повышения эффективности применения магнитотеллурических (МТ) методов для решения геологоразведочных задач при поисках месторождений углеводородов, твердых полезных ископаемых, изучения глубинного строения сейсмоопасных регионов. В условиях наличия интенсивных помех, создаваемых локальными приповерхностными неоднородностями (ЛПН), применение МТ методов для решения поставленных задач крайне затруднено. Для решения вопросов снятия их влияния на МТ методы соискатель направил свои усилия по развитию способов обработки и анализа компонент матриц импеданса, теллурического тензора и их инвариантов. Им разработан комплекс программ, реализующий известные и новые методологии по развитию МТ

наблюдений. В этом плане диссертационная работа представляется крайне актуальной.

Цель и задачи исследований

Соискатель сформулировал цель: повысить эффективность методики интерпретации магнитотеллурических методов на основании анализа эффективности методов декомпозиции тензора импеданса $[Z]$, теллурического тензора $[T]$ и нормализации кривых МТЗ с помощью методов пространственной фильтрации и разработке **оптимальной методики подавления приповерхностных искажений**. В соответствие с поставленной целью сформулированы задачи по:

1. Проведению моделирования МТ поля для модели с различными вариантами приповерхностного слоя.
2. Разработке программ по анализу МТ данных, разделения локальных и региональных эффектов, нормализации амплитудных кривых МТЗ.
3. Анализ синтетических МТ данных при оценке искажающего влияния ЛППН в тензоре импеданса и теллурическом тензоре, и оценке возможности разделения локальных и региональных эффектов в тензоре импеданса.
4. Адаптации методов разделения локальных и региональных эффектов к теллурическому тензору и оценка их возможностей.
5. Исследованию эффективности пространственной низкочастотной фильтрации кривых МТЗ и выбора оптимального способа нормализации дополнительных компонент тензоров $[Z]$ и $[T]$.
6. Определение места рассмотренных методов в МТ исследованиях.

Эти задачи отвечают поставленной в диссертационной работе цели, а разработанное программное обеспечение может применяться для анализа МТ данных при подавлении приповерхностных эффектов, их визуализации и преобразования в различные форматы. Результаты исследований **приведены в учебном курсе «Прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований»**, читаемом на кафедре геофизики геологического факультета МГУ.

Первая глава работы содержит подробные сведения о природе приповерхностных аномалий электропроводности, наличия имеющихся способах обработки МТ данных и снятия ЛППН помех с помощью методов нормализации МТ кривых. На основании проведенного анализа представлена классификационная схема выделения глубинных структур. Это серьезная и кропотливая исследовательская работа (автором проанализировано свыше 30 статей по данной тематике), которая остается как бы за экраном, но она необходима при выборе дальнейшего пути в исследованиях по нормализации кривых МТЗ и данных метода теллурических токов (ТТ). На основании рассмотрения фазового и амплитудного тензоров импеданса оценивается влияние поверхностных искажений. Представленный обзор методов подавления помех от влияния локальных неоднородностей отражает важную проблему в МТ исследованиях: нормализацию кривых МТЗ, которую решает соискатель.

Вторая глава посвящена анализу изучению МТ характеристик, в моделях, состоящих из региональной структуры – параллелепипеда, аппроксимирующего глубинную и более проводящих и высокоомных локальных включений в верхнем слое. Соискателем совместно с П.Ю. Пушкаревым и Д.Д. Поповым составлены программы по расчету компонент МТ поля, тензоров: импеданса - $[Z]$, Визе-Паркинсона $[W]$, магнитного - $[M]$, теллурического - $[T]$ полей и их инвариантов. Для составленных моделей глубинной структуры, перекрытой верхним слоем с вкрапленными неоднородностями, проведены расчеты кривых кажущегося сопротивления, фаз импедансов в точках наблюдений, отвечающих наиболее важным ситуациям при построении геоэлектрических разрезов в рассматриваемых 3D моделях. Анализ инвариантных характеристик матрицы импеданса, норм теллурических и магнитных матриц позволил изучить зависимость направления осей матриц импедансов, их размерности от периода вариаций МТ поля и положения точек наблюдений.

Оценена степень зависимости отклонений кривых кажущегося сопротивления от нормальной кривой зондирования, при разных параметрах локальных неоднородностей. Показана зависимость фаз импедансов, норм матриц Визе-Паркинсона, горизонтального магнитного тензора к влиянию ЛППН и эффективность выделять ими глубинные структуры, в отличие от искаженных влиянием ЛППН теллурического и импедансных тензоров.

Не совсем понятно, как снимать на малых периодах влияние магнитных аномалий, формируемых включениями в верхнем слое на компоненты тензора импеданса при рассмотрении методов декомпозиции

В третьей главе, на основании проведенных расчетов инвариантных характеристик тензора импедансов, показано что методы:

- декомпозиции Бара и фазового тензора наиболее устойчивы к влиянию локальных неоднородностей в искаженных влиянием ЛППН региональных МТ полях. Они выделяют главные направления, связанные с региональными структурами, в отличие метода Эггерса, который дает смещенные оценки.

При этом метод Бара менее устойчиво фиксирует направления главных осей матриц импедансов, по сравнению с полярными диаграммами.

- Диаграммы фаз главной компоненты и фазовые кривые, устойчивы к влиянию приповерхностных неоднородностей. Они позволяют определять главные направления региональной структуры.

- Поведение главных компонент фазового тензора и фаз тензора импеданса близки. Их ориентировка отвечает азимуту простирания региональных структур.

- Дополнительная компонента фазового тензора дает информацию о размерности и симметричности среды, его ориентировка о простирании структуры, а степень сжатости и размерности среды.

Однако, желательно объяснять, некоторые особенности поведения импедансных диаграмм, например, почему: в точке 1 (рис. 3.6) расположенной в углу модели при добавлении изометрической

приповерхностной неоднородности диаграмма дополнительного импеданса свидетельствует о 2D модели на всех периодах; диаграммы в точке 2 на периодах $T = 100$ с в модели с ЛППН и без них (рис. 3.7) почти не отражают влияние борта впадины, а на высокоомном борту впадины (рис. 3.9 - 3.11); в точке 4, полярные диаграммы фаз и импедансов на низких частотах в среде с ЛППН отвечают квазиодномерной модели, а не трехмерной.

В четвертой главе раскрываются возможности применения методов декомпозиции при выделении региональной составляющей теллурического тензора $[T]$. Показано, что модули и фазы эффективной компоненты T_{eff} и его главные компоненты позволяют картировать глубинную неоднородность, демонстрируя (в случае модуля) или игнорируя (в случае фазы) проявление ЛППН. Карты параметров асимметрии Свифта и Бара для теллурического тензора выделяют области развития трехмерных эффектов, как от всех структур (в методике Свифта), так и только от глубинных (метода Бара). Фазовый теллурический тензор $[\Phi^T]$ предложенный в работе [Bakker et al., 2015] позволяет избавиться от влияния ЛППН, сильно искажающих региональное электрическое поле, характеризуя азимуты региональной структуры и размерность среды.

Анализ теллурического тензора $[T]$ и его фазового тензора $[\Phi^T]$ дает новую информацию о геоэлектрических структурах, в том числе глубинных, что доказывает четкость **защищаемого первого положения**.

В пятой главе рассмотрены предложенные автором подходы к нормализации кривых МТЗ с помощью пространственной низкочастотной фильтрации с различными сглаживающими функциями и весовыми характеристиками, уменьшающимися с расстоянием от рассматриваемой кривой МТЗ по линейному закону или по экспоненциальному. При этом учтены веса полей от влияния ЛППН. Показана степень проявления глубинных структур при различных сглаживающих фильтрах. *Более понятно эффекты нормализации будут видны, если бы рассматривались карты*

кажущихся сопротивлений, а не импедансов. Не раскрыто содержание ф. 5.5, почему дан угол в 45° , для оценки весовой характеристики W^D ?

На основании проведенной серии расчетов с различными параметрами фильтров показано, какие параметры должны быть у сглаживающих характеристик, для эффективного подавления шумов от ЛППН в главных компонентах тензоров $[Z]$ и $[T]$ и в эффективных компонентах Z_{eff} и T_{eff} . Результат нормализации улучшается за счет введения дополнительного веса, «штрафующего» точки МТЗ за значительные отклонения уровня кривой от среднего в скользящем окне, а также весов «штрафующих» за различие главных направлений полярных диаграмм модуля основной компоненты тензора импеданса и основной компоненты фазового тензора.

Проведенные численные опыты по оценке эффективности нормализации кривых МТЗ с применением пространственной низкочастотной фильтрации с введением дополнительных весов за расхождение между осями амплитудных и фазовых полярных диаграмм и за отклонение уровня кривой от среднего в скользящем окне, введение штрафных функций и коэффициентов нормализации, доказывает **второе положение** диссертации.

Анализ нормализованных данных показал, что эффективность нормализации дополнительных компонент тензора импеданса и теллурического тензора гораздо ниже, чем их основных компонент. Автор предлагает использовать при нормализации дополнительных компонент коэффициенты смещения, определённые для их главных компонент, связанных с той же составляющей электрического поля, что отражено в **третьем защищаемом положении**.

Основные положения представленной диссертационной работы

Соискатель рассчитал и показал на моделях, отражающих типичное распределение проводимости в коре континентальных плит, что нормы матриц Визе-Паркинсона, горизонтального магнитного тензора, параметров асимметрии Бара и фазового тензора свободны от влияния локальных

искажений. Это выгодно их отличает от кривых кажущегося удельного сопротивления, теллурического тензора, параметров неоднородности и асимметрии Свифта, которые подвержены значительному влиянию ЛППН.

Диссертантом показано, что методы декомпозиции Бара и фазового тензора имеют возможность определять направления простирания впадин, как и полярные диаграммы фазы основной компоненты тензора импеданса и эллипсы фазового тензора. Эти инструменты анализа МТ поля были адаптированы и к теллурическому тензору. Теллурический фазовый тензор показал устойчивые результаты при определении главных направлений региональной структуры, анализе размерности среды и оценке параметров впадины.

Автор диссертации рассчитал и показал, какие параметры должны быть у сглаживающих фильтров для эффективного подавления шумов от ЛППН в главных компонентах тензоров $[Z]$, $[T]$, эффективных компонентах Z_{eff} и T_{eff} . Эффективность нормализации дополнительных компонент тензоров $[Z]$ и $[T]$, ввиду их резкой пространственной изменчивости, гораздо ниже, чем их основных компонент.

Научная новизна, достоверность исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна исследований, результатов и выводов **присутствует** на многих этапах диссертационной работы. Наиболее четко она проявилась в **методе теллурических токов и пространственной фильтрации МТ полей** при снятии гальванических искажений с кривых МТЗ. Предлагаемые методы обработки МТ данных, с учетом авторской методики снятия влияния приповерхностных локальных неоднородностей **должны повысить результативность интерпретации магнитотеллурических методов**. В разработке программного обеспечения, при обработке модельных магнитотеллурических полей, повышении эффективности используемых алгоритмов, их коррекции соискатель принимал **непосредственное участие**.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации и практическая значимость работы

1. Соискателем проведен детальный анализ на модельных данных алгоритмов декомпозиции в методе Занга-Бара, фазового тензора. Показана их эффективность по сравнению с методом Эггерса. Надо отметить прагматический подход соискателя в разработке программного комплекса. Он сосредоточил своё внимание и усилия на наиболее понятных методах, с минимумом определяемых параметров в матрицах, преобразующих тензоры импеданса и теллурический. Существует достаточно широкий набор алгоритмов, разделяющих эти тензоры по составляющим, в каждом из которых определяются направления размерности глубинных структур, их ориентации и построение функций наиболее свободных от влияния приповерхностных искажений. *В дальнейшем молодому ученому, имеет смысл провести их апробацию на своих модельных МТ полях и найти положительные и отрицательные их стороны.*

2. Оценки размерности структур верхнего (ЛППН) и нижнего этажей (региональных структур) их ориентации относительно системы координат имеет **важнейшее значение при дальнейшей интерпретации МТ данных в процедурах 2D или 3D инверсий** и при проведении оценочного трехмерного моделирования, по первичным (1D-2D) геоэлектрическим моделям.

Эти оценки необходимо выполнять с учетом погрешностей определения измеренных компонент тензоров импеданса и теллурических, а также величины локальных магнитных аномалий, генерируемых включениями в верхнем пласте, регистрации и обработке МТ данных.

3. Метод теллурических токов себя положительно зарекомендовал во многих регионах при поисках рудных месторождений и углеводородного сырья. Предложенный соискателем новый подход к его обработке, основанный на применение метода фазового тензора, **несомненно,**

заслуживает интерес и нуждается в апробации на экспериментальных данных.

4. Заслуживает интерес предложенные автором диссертации **новых подходов к** нормализации компонент тензора импеданса с учетом ряда весовых коэффициентов, зависящих от отклонения уровня кривой от среднего в скользящем окне». Этот подход нуждается в дальнейшем опробовании на импедансах зашумленных приповерхностными искажениями.

Окончательное заключение о результативности, представленных в диссертационной работе Суконкина М. А., предложений их разработок и программного обеспечения покажет их апробация на экспериментальных МТ данных, где велико влияние исходных, технических шумов и разбросанность в положении точек наблюдения при рассмотрении тензоров декомпозиции и проведении пространственной фильтрации.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.9. Геофизика (технические науки), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено, согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Суконкин Максим Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9. Геофизика.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент,

Главный научный сотрудник лаборатории методологии интерпретации электромагнитных данных Центра геоэлектроманитных исследований филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им: О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

БЕЛЯВСКИЙ Виктор Владимирович

05.11.2025

Контактные данные: тел. _____, e-mail: g

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.10. Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Адрес места работы: 108840, г. Москва, г. Троицк, а/я 30

Центр геоэлектроманитных исследований филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, лаборатория методологии интерпретации электромагнитных данных

Тел.: 8(495)840-70-62; e-mail: gemri@igemi.troitsk.ru,

Подпись главного специалиста по кадрам Курчанова Л.Н.

Подпись Белявского В.В. заверяю.

Главный спец

Л.Н. Курчанова

06.11.2025